

# LAPORAN PENELITIAN

0900542



## SINTESIS DIMENSI DAN TORSI MANIPULATOR 2 LENGAN DENGAN METODE ROBUST DESIGN DENGAN PENDEKATAN ROBUSTNESS INDEX

MOCH. SYAMSUL MA'ARIF, ST., MT.  
ISHARDITA PAMBUDI TAMA, ST., MT.

Dilaksanakan Atas Biaya Dana Pengembangan Pendidikan  
Fakultas Teknik Universitas Brawijaya  
Berdasar Surat Perjanjian Pelaksanaan Penelitian  
Nomor 11/J.10.1.31/PG/2006  
Tanggal 17 April 2006

FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
Oktober, 2006

## HALAMAN PENGESAHAN

1. Judul Penelitian : Sintesis Dimensi dan Torsi Manipulator 2 Lengan dengan Metode *Robust Design* dengan Pendekatan *Robustness Index*.
2. Ketua Peneliti
  - a. Nama Lengkap dan Gelar : Moch. Syamsul Ma'arif, ST., MT.
  - b. Jenis Kelamin : L
  - c. Pangkat/Golongan/NIP : Penata Muda / III A / 132 288 243
  - d. Jabatan Fungsional : Asisten Ahli
  - e. Jabatan Struktural : -
  - f. Fakultas / Jurusan : Teknik / Mesin.
3. Anggota Pelaksana : 1 orang
  - a. Nama Anggota Peneliti : Ishardita Pambudi Tama, ST., MT.
4. Lokasi Penelitian : Laboratorium Metrologi Industri  
Jurusan Mesin FT-Unibraw.
5. Jangka Waktu Penelitian : 6 bulan
6. Biaya Penelitian : Rp. 6.000.000,- (Enam juta Rupiah)
7. Sumber Dana : DPP SPP Tahun Anggaran 2006

Malang, 17 Oktober 2006

Mengetahui :  
Ketua BPP  
Fakultas Teknik Unibraw



Dr. Ir. Arif Rachmansyah  
NIP. 132 059 302

Ketua Peneliti,



Moch. Syamsul Ma'arif, ST., MT.  
NIP. 132 288 243

Menyetujui,

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Brawijaya


Ir. Imam Zaky, MT.  
NIP. 130 604 494

## KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan segala puji dan syukur ke hadirat Allah SWT., atas segala berkah dan rahmat-Nyalah laporan penelitian dengan Judul Sintesis Dimensi dan Torsi Manipulator 2 Lengan dengan Metode *Robust Design* dengan Pendekatan *Robustness Index* ini dapat diselesaikan.

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada berbagai pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, saran terhadap penulis dalam menyelesaikan penelitian ini.

1. Bapak Rektor Universitas Brawijaya
2. Bapak Dekan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
3. Bapak Ketua BPP Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
4. Semua pihak yang ikut membantu kelancaran penyelesaian penelitian ini

Penulis menyadari bahwa tulisan ini tidak lepas dari kekurangan-kekurangan, untuk itu penulis menerima kritik dan saran dari pembaca dan mohon maaf jika terdapat kesalahan.

Malang, Oktober 2006

Penulis



## RINGKASAN

Sebuah lengan robot selalu dipersyaratkan mempunyai ketelitian posisi yang memadai. Ketelitian posisi sangat dipengaruhi oleh variasi selisih antara posisi ujung lengan sesungguhnya dan posisi ujung lengan nominal. Variasi bisa berasal dari desain dan dari proses manufaktur. Variasi yang berasal dari proses manufaktur berusaha untuk ditanggulangi dengan mengurangi variasi pada material dan lingkungan operasi. Sedangkan pada tahap desain dapat diusahakan agar menjadi desain yang *robust*. Jika variasi-variasi ini diabaikan dalam proses desain maka akan berakibat dihasilkan desain yang *non robust*. Desain *non robust* akan sangat mahal untuk diproduksi atau bahkan membuatnya gagal pada saat operasi. Oleh karena itu, suatu desain yang *robust* terhadap variasi ini sangat diperlukan.

Dalam usaha untuk mendapatkan desain yang *robust*, maka pada proses desain lengan robot dilakukan dengan melakukan dua tahapan yang saling independen dan komplementer yaitu tahap pertama adalah proses penghitungan dimensi mekanisme dengan memakai *robustness index* dan tahapan kedua adalah menghitung toleransi dimensi yang diberikan dengan memakai metode sintesis toleransi yang tidak dilakukan pada penelitian ini. Beberapa variabel *Robust Design* yang dipilih adalah *Design Variable (DV)* yang dinyatakan dalam  $x = [l_1, l_2]^T$ , dan *Performance Function* yang dinyatakan dalam  $f = [e_1^T, e_2^T, e_k^T]^T$ . Setelah itu ditentukan dimensi lengan manipulator dengan pertolongan *robustness index* dengan memakai persamaan  $RI_2 = \|J\|_2 = \sigma_{\max}$ . Setelah  $l_1 = l_{1 \text{ opt}}$  dan  $l_2 = l_{2 \text{ opt}}$  diketahui maka selanjutnya digunakan untuk menghitung torsi lengan manipulator dengan melakukan beberapa penyederhanaan.

Dari penelitian didapatkan kombinasi  $l_1 \approx 5.61$  dan  $l_2 = 3.97$  untuk kasus 1 dan  $l_1 = 5.85$  dan  $l_2 = 4.16$  untuk kasus 2. Torsi minimal didapat dengan memakai kriteria dexterity. Kesimpulan yang bisa diambil adalah penelitian ini menunjukkan bahwa metode *tolerance synthesis* merupakan metode yang efisien dalam mendesain lengan robot yang *robust*.

Kata kunci: *robust design*, *robustness index*, manipulator 2R, sintesis dimensi dan torsi.



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
RINGKASAN	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	viii
<b>I PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Pentingnya Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
<b>II TINJAUAN KEPUSTAKAAN</b>	<b>5</b>
2.1 Proses Desain	5
2.2 Metode Taguchi dalam Rekayasa Kualitas	7
2.3 <i>Robust Design</i>	9
2.3.1 Dual response approach	11
2.3.2 Taguchi approach (inner/outer array approach)	13
2.3.3 Pendekatan <i>Tolerance Analysis</i>	15
2.4 Sumber <i>Noise</i> (Gangguan)	16
2.5 Manipulator 2R	16
2.6 Persoalan Desain <i>Robust</i> pada Manipulator	17
2.6.1 Kuantifikasi Atribut <i>Workspace</i> Lengan Manipulator 2 Link	18
2.6.2 Persoalan Kepresisian Posisi Lengan Manipulator	19
2.7 Metode <i>Robustness Index</i>	20
2.7.1 Penentuan variabel <i>robust design</i>	22
2.7.2 Pemilihan <i>robustness index</i> yang cocok	25
2.8 Metode Optimisasi Dimensi	26
2.9 Metode <i>tolerance analysis</i>	26
2.10 Menghitung Torsi yang Dibutuhkan Lengan Manipulator	28
<b>III METODOLOGI PENELITIAN</b>	<b>30</b>
<b>IV PENELITIAN</b>	<b>33</b>
4.1 Tahap Pemilihan Sistem Mekanis	33
4.2 Manipulator 2R Dengan Daerah Kerja Tertentu	33
4.3 Penentuan Variabel <i>Robust Design</i> untuk Manipulator 2R Dengan Daerah Kerja Tertentu	34
4.4 Tahap Penentuan <i>Robustness Index</i>	34

4.5 Studi Kasus	34
4.5.1 Daerah Kerja Dibatasi oleh 4 Buah Titik (Caro : 2005)	34
4.5.2 Daerah Kerja Dibatasi oleh 4 Buah Titik	44
4.6 Tahap Penentuan Kombinasi Dimensi Manipulator	52
4.7 Tahap Penghitungan Torsi Motor	52
<b>V ANALISIS DATA</b>	<b>56</b>
<b>VI KESIMPULAN</b>	<b>57</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Pengaruh X terhadap Y	10
Gambar 2.2	<i>Robustness</i>	10
Gambar 2.3	<i>Plotting</i> $\sigma_y(t_k)$	11
Gambar 2.4	Posisi ujung lengan dan vektor kartesian yang bersesuaian	17
Gambar 2.5	Elipsoidal sensitivitas desain	24
Gambar 2.6	<i>Tolerance Synthesis</i> $l=2$	26
Gambar 3.1	Metodologi Penelitian	30
Gambar 3.2	Manipulator 2R	31
Gambar 4.1	Daerah kerja manipulator 2R	33
Gambar 4.2	<i>Plotting</i> Kondisi Batas Kasus 1	35
Gambar 4.3	<i>Plotting</i> $R_{12}$ Kasus 1	37
Gambar 4.4	Variabel desain untuk nilai $R_{12}$ yang sama	38
Gambar 4.5	<i>Robust</i> Manipulator berdasar $R_{12}$	39
Gambar 4.6	<i>Plotting</i> <i>Dexterity</i> Kasus 1	40
Gambar 4.7	<i>Plotting</i> <i>Dynamic Manipulability</i> Ellipsoid Kasus 1	43
Gambar 4.8	<i>Plotting</i> Kondisi Batas Kasus 2	45
Gambar 4.9	<i>Plotting</i> $R_{12}$ Kasus 2	47
Gambar 4.10	<i>Plotting</i> <i>Dexterity</i> Kasus 2	49
Gambar 4.11	<i>Plotting</i> <i>Dynamic Manipulability</i> Ellipsoid Kasus 2	51



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Data bagi Pendekatan <i>Dual Response</i>	12
Tabel 2.2	Perkiraan Harga Nilai Rata-rata dan Standar Deviasi	12
Tabel 2.3	Data untuk Pendekatan Taguchi 1	14
Tabel 2.4	Data untuk Pendekatan Taguchi 2	14
Tabel 2.5	Harga Nilai Rata-rata dan Standar Deviasi dari Y	15
Tabel 4.1	Variabel elips	38
Tabel 4.2	Pasangan ( $l_1, l_2$ ) yang memenuhi $RI_2 \approx 2$	39
Tabel 4.3	Variabel elips	48
Tabel 4.4	Kombinasi Dimensi Manipulator	52
Tabel 4.5	Parameter Penghitungan Torsi	53
Tabel 4.6	Parameter Penghitungan Torsi (lanjutan)	53
Tabel 4.7	Torsi Manipulator	54
Tabel 4.8	Torsi untuk panjang manipulator lainnya	55



## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Karakteristik desain sebuah produk yang bermutu sering dinyatakan dalam empat hal pokok yaitu kemampuan memenuhi kebutuhan fungsional, efisiensi dalam menggunakan energi, kehandalan, dan kemampurawatan yang baik (Batson : 2000). Lengan manipulator, sebagai salah satu desain rekayasa juga harus memenuhi keempat kriteria diatas. Karakteristik produk lengan manipulator, seperti produk yang lain, bisa menurun akibat terpengaruh oleh derau (*noise*) dalam operasinya. Derau ini berasal dari berbagai sumber semisal operasi manufaktur, variasi material dan lingkungan operasi. Agar terbebas dari derau, metode *robust design* (metode Taguchi) banyak dipakai sebagai solusi dan terbukti mampu mengatasi gangguan akibat derau tersebut.

Berhubungan dengan usaha mendapatkan desain yang *robust*, ada beberapa pendekatan yang bisa dipakai antara lain metode Taguchi, metode *dual response*, dan metode *tolerance analysis*. Ketiga pendekatan itu mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing. Meskipun demikian secara umum pendekatan *tolerance analysis* dipertimbangkan sebagai metode terbaik (Taylor : 1996). Sebagai akibatnya metode ini lebih banyak dipakai dalam proses perancangan. Beberapa penelitian, yang berusaha mendapatkan rancangan mekanisme yang *robust* dengan menggunakan metode *tolerance analysis*, mencoba untuk membuat pendekatan yang berbeda. Metode-metode seperti *tolerance analysis methods* untuk sistem nonlinier dengan berbasis pemrograman non linier (Lee : 1993), *direct linierization methods* yang diaplikasikan pada assembly mekanik 2D dan 3D (Chase et al : 1998), *deterministic methods* yang bertujuan mendapatkan dimensi nominal yang optimum (Parkinson : 2000), serta pemakaian *robustness index* (Caro : 2005 dan Zhu : 2001) merupakan contoh dari upaya tersebut. Metode *robustness index* memberikan kesesuaian kondisi yang lebih tinggi dibanding

dengan 3 metode lainnya dalam menyatakan *robustness* sebuah desain mekanis. Disamping itu, kemudahan dalam integrasi kriteria lain yang ditambahkan kemudian juga merupakan keuntungan tersendiri. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Caro et.al, dan Zhu, et. al telah didemonstrasikan kemampuan dari metode *robustness index* dalam menghasilkan desain yang *robust*.

Di kedua penelitian tentang metode *robustness index* diatas, *design variabel* (DV) yang dipakai adalah dimensi lengan manipulator dengan *performance function* yang diharapkan adalah kepresisian posisi ujung lengan. Dalam kedua penelitian tersebut sintesis dimensinya dihitung berdasarkan *tolerance box* yang ditentukan dari elipsoidal sensitivitas desain. Filosofi yang dipakai di kedua penelitian itu adalah diinginkan *tolerance box* tersebut seluas mungkin karena semakin luas *tolerance box* tersebut maka toleransi juga akan meningkat. Peningkatan toleransi ini akan menurunkan ongkos pembuatan dan masih menghasilkan desain yang *robust* asal *tolerance box* tersebut masih di dalam elipsoidal (Caro : 2005).

Dalam usulan penelitian ini dicoba untuk meneruskan hasil penelitian tersebut lebih lanjut dengan menambah *performance function*-nya dengan torsi motor penggerak. Hal ini didasari pada kenyataan bahwa besarnya torsi motor penggerak sangat berhubungan dengan konsumsi energi listrik. Semakin minimal torsi motor penggerak berarti semakin minimal konsumsi energi listrik. Akibatnya perlu dilakukan optimisasi antara kedua hal tersebut.

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan utama yang dapat dirumuskan adalah sebagai berikut :

“ Bagaimana menyintesis dimensi lengan manipulator 2R menggunakan metode *tolerance analysis* berpendekatan *robustness index* dengan target kepresisian posisi dengan dan torsi motor yang optimal”.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :



- Menyintesis dimensi lengan manipulator yang *robust* terhadap *noise* dengan metode *tolerance analysis* dengan pendekatan *robustness index*.
- Memberi alternatif komposisi lengan manipulator yang optimum dari segi kepresisian dan torsi motor (konsumsi energi listrik).

#### 1.4 Pentingnya Penelitian

Diharapkan penelitian ini dapat :

- Mengembangkan teknologi robotika di Indonesia terutama dalam sintesis dimensi lengan mekanis.
- Ikut memberi andil dalam penghematan energi listrik melalui pengembangan metode perancangan dengan memperhatikan konsumsi energi manipulator yang optimal.

#### 1.5 Ruang Lingkup

Agar pembahasan pada penelitian ini menjadi terarah maka perlu diberikan batasan-batasan sebagai berikut :

- Mekanisme yang dijadikan obyek penelitian adalah manipulator RR.
- Daerah kerja manipulator yang dibahas berupa daerah yang dibatasi oleh 4 buah titik.
- Persamaan posisi dan torsi yang digunakan dianggap mewakili sistem.

#### 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada laporan ini adalah sebagai berikut :

##### Bab 1 Pendahuluan

Berisi latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, pentingnya penelitian, ruang lingkup dan sistematika penulisan.

##### Bab 2 Tinjauan Pustaka

Berisi teori-teori yang sesuai dengan topik pembahasan dalam penelitian ini. Berisi kajian pustaka mengenai ketelitian lengan manipulator, *robust design*,

sumber *noise*, metode *robustness index*, pemilihan *robustness index* yang cocok, metode *tolerance analysis*, menghitung torsi motor yang diperlukan.

### Bab 3 Metodologi Penelitian

Berisi urutan langkah-langkah atau tahapan yang dilakukan dalam penelitian berupa diagram alir (*flow chart*) dan penjelasannya. Metodologi tersebut terbagi dalam empat bagian pokok yaitu : tahap identifikasi masalah, tahap pemilihan sistem mekanis, tahap penentuan variabel *robust design*, tahap penentuan *robustness index*, tahap penentuan dimensi manipulator, tahap penentuan kombinasi dimensi manipulator, tahap penghitungan torsi motor, dan tahap analisis data.

### Bab 4 Penelitian

Berisi proses perhitungan *robustness index*, perhitungan dimensi manipulator, perhitungan toleransi dimensi, dan perhitungan torsi motor.

### Bab 5 Analisis Data

Berisi analisis data yang diperoleh dari bab 4 serta kemungkinan pengembangan metode yang digunakan lebih lanjut.

### Bab 6 Kesimpulan dan saran

Berisi kesimpulan dan saran yang berkaitan dengan masalah yang diteliti dan tujuan yang ingin dicapai serta saran-saran yang berguna untuk penelitian yang berhubungan di masa yang akan datang.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Proses Desain

Dalam proses desain, biasanya dikenal tiga macam fase yang harus dilalui oleh para desainer untuk menghasilkan produk yang handal. Ketiga tahapan itu adalah :

#### 1. Konsep desain

Dalam tahap ini biasanya kehandalan desain masih belum dipertimbangkan. Di tahapan ini dicari kemungkinan untuk mengkombinasikan teknologi dengan cara baru yang memungkinkan untuk memenuhi spesifikasi yang ditetapkan.

#### 2. Preliminary design

##### 2.a Worst Case Analysis

Dengan menggunakan ekstrim dari toleransi part dan kondisi lingkungan untuk memverifikasi apakah desain masih bisa berfungsi dalam menghadapi bermacam-macam efek derau. Pengetesan dari toleransi part yang ekstrim mewakili *unit-to-unit noise (manufacturing variation)* dan *internal noise*, seperti keausan di komponen-komponen mekanis atau “drift” untuk komponen elektrik.

##### 2.b Fault Tree Analysis

Merupakan penjabaran sistematis dari kemungkinan kegagalan produk atau layanan kedalam komponen-komponen penyebabnya, berdasarkan fungsi produk dan layanan. Setiap kegagalan mungkin mempunyai beberapa rantai penyebab, dan logika dari kegagalan dinyatakan dengan bantuan gerbang AND dan OR. Setelah semua fungsi yang penting dijabarkan dalam *fault tree* masing-masing, tim perancang harus memutuskan rancangan terbaik agar mampu mencegah kegagalan.



### 2.c Value Analysis

*Value analysis* fungsi diberikan melalui penilaian terhadap part-part yang tidak *reliable* untuk meningkatkan *reliability* maupun *maintainability*. Kebutuhan pemakai akan part-part yang tidak *reliable* tersebut dipertimbangkan sebaik mungkin. Jika tidak seberapa perlu, maka sebaiknya part-part tersebut dihilangkan untuk meningkatkan *reliability*.

### 2.d Trade-off Study

Dilakukan untuk mempelajari kemungkinan peningkatan *reliability* dengan mengurangi tingkat unjuk kerja fungsional, meningkatkan kekuatan material, penyederhanaan konfigurasi dll. Juga dipertimbangkan masalah *redundancy*.

### 2.e Technological Control

Pengontrolan terhadap faktor lingkungan kerja akan sangat berguna dalam menurunkan *failure rates*.

## 3. Detail Design

### 3.a Failure Mode and Effect Analysis

Adalah analisis sistematis terhadap kemungkinan kegagalan produk, berdasarkan desain produk. Untuk setiap *top level component (sub system)*, desainer harus mengidentifikasi tentang kemungkinan bagaimana kegagalan komponen bisa terjadi. Setiap kegagalan dinyatakan dalam terminologi kegagalan, kemungkinan penyebabnya dan efek dari kegagalan itu. Setiap efek dihitung kemungkinan terjadinya, *severity*, dan kemungkinan deteksi awal untuk mencegahnya.

### 3.b Part Derating

Didasarkan pada observasi bahwa part yang diberi tegangan diatas tegangan maksimum akan gagal lebih cepat dari part yang dibebani lebih rendah. *Derating* yang disengaja akan meningkatkan *reliability* part.

### 3.c Redundancy

Adalah pendekatan yang dipakai jika secara ekonomi ongkos yang diakibatkan oleh *failure* lebih besar dibandingkan dengan ongkos pemakaian komponen *redundant*.

### 3.d Material/Component Selection

Adalah strategi desain untuk menspesifikasi material yang lebih kuat atau lebih berkualitas dan menghindari pemakaian *part* yang relatif baru atau *part* yang belum teruji.

### 3.e Prescribed Screening Test

Sering digunakan untuk mendeteksi "*infant mortality*" dalam *assembly* barang elektronik atau dapat pula digunakan untuk mendeteksi "kebocoran" pada pompa / pipa air, pompa hidrolik / pipa hidrolik dsb.

## 2.2 Metode Taguchi dalam Rekayasa Kualitas

Terminologi rekayasa kualitas mencakup segala sesuatu yang berhubungan dengan aktivitas rekayasa dan operasional yang bertujuan untuk menjamin bahwa karakteristik kualitas produk memenuhi nilai nominal atau target yang ditetapkan. Bidang ini sangat dipengaruhi oleh pemikiran Genichi Taguchi terutama untuk bidang perancangan baik pada perancangan produk maupun perancangan proses. Metode Taguchi meliputi beberapa bidang yaitu :

### 1. Off-line dan on-line quality control

*Off-line quality control* sangat berhubungan dengan isu-isu perancangan baik perancangan produk maupun perancangan proses.

Bidang *off-line quality control* terdiri dari dua tahapan yaitu desain produk dan desain proses. Tahapan-tahapan yang dilalui oleh kedua proses tersebut oleh Taguchi dinamakan :

#### a. System Design

Merupakan fase dimana konsep, ide dan metode baru dibangkitkan untuk memberikan atau memperbaiki produk yang dipakai konsumen.

b. *Parameter Design*

Fase yang penting untuk memperbaiki keseragaman produk dan dapat dilakukan bahkan tanpa ongkos. Atau bisa juga disebutkan bahwa tahap ini sangat memperhatikan *setting* parameter yang optimal untuk produk maupun proses. Dalam proses ini nilai nominal untuk parameter produk maupun proses dispesifikasikan.

c. *Tolerance Design*

Fase perbaikan kualitas dengan ongkos serendah mungkin. Tujuannya adalah menspesifikasi toleransi yang sesuai disekitar nilai nominal yang telah ditentukan pada tahapan *parameter design*.

*On line quality control* sangat berhubungan dengan operasi produksi dan hubungan dengan konsumen setelah produk dikirim. Bidang *on-line quality control* terdiri dari :

- a. *Process diagnosis* dan *adjustment*.
- b. *Process prediction* dan *correction*.
- c. *Process measurement* dan *action*.

2. *Robust design*

Sebuah desain dikatakan *robust* jika fungsi atau unjuk kerja dari produk atau proses relatif tidak sensitif terhadap variasi (*noise factors*). Dalam hal produk, dikatakan *robust* jika produk tersebut masih dapat mempertahankan unjuk kerja secara konsisten dengan gangguan yang minimal jika terjadi variasi yang tidak terkontrol. Penjelasan lebih lanjut tentang *robust design* dapat dilihat pada sub bab 2.3 dibawah ini.

3. *Loss function*

*Loss function* dari Taguchi sangat bermanfaat dalam hal penentuan *tolerance design*. Taguchi mendefinisikan kualitas sebagai “Kerugian yang diakibatkan oleh sebuah produk (yang gagal) dinyatakan sebagai ongkos yang ditanggung oleh masyarakat sejak produk dikirim ke konsumen” Kerugian tersebut terjadi jika karakteristik fungsi dari produk menyimpang dari nilai nominal atau nilai target.



## 4. Perancangan percobaan

## 2.3 Robust Design

*Robust design* merupakan metode yang dipakai dalam mendapatkan produk yang *robust*. Metode ini memakai pendekatan *parameter design*, seperti yang diusulkan oleh Genichi Taguchi, dalam usaha optimasi rancangan produk dan proses yang tidak sensitif (kebal) terhadap *noise*. Oleh karena itu, sebuah produk dikatakan *robust* jika produk tersebut tidak sensitif terhadap efek sumber keragaman seperti variasi dalam operasi manufaktur, variasi dari sifat material, dan lingkungan (Batson : 2000).

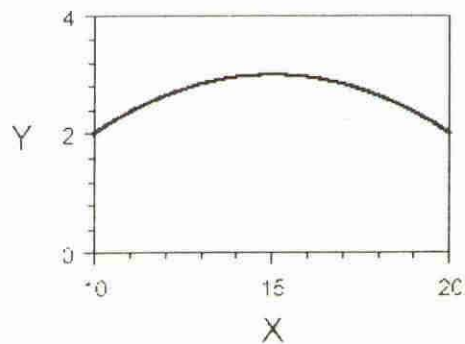
*Robust design* bertujuan untuk meminimalisasi sensitifitas unjuk kerja sebuah produk terhadap variasi-variasi yang mungkin timbul tanpa harus mengontrol penyebab variasi-variasi tersebut. Keuntungan yang didapat dari metode ini adalah memaksimalkan nilai MTTF (*Mean Time To Failure*) sehingga akan sangat menaikkan jeda waktu antar pemeliharaan. Tentunya ini akan sangat menguntungkan dipandang dari segi biaya operasional produk.

Dalam mencapai desain yang *robust*, beberapa metode pendekatan yang umum dipakai adalah metode pendekatan Taguchi, metode pendekatan *Dual Response*, dan metode pendekatan *Tolerance Analysis*. Ketiga pendekatan ini mempunyai perbedaan yang penting dalam hal persyaratan-persyaratan yang diperlukan dan hasil-hasil yang didapat. Ketiga pendekatan tersebut umum dipakai jika permasalahan yang dikaji tidak mempunyai fungsi tertentu yang menghubungkan *design variabel* (DV atau X) dan *design parameter* (DP atau Y).

Misal dipunyai persamaan yang menghubungkan X dan Y, maka penyelesaian eksak masalah desain *robust* akan dapat dengan mudah dicari. Misal persamaan yang dimaksud adalah :

$$Y = -6 + 1.2 X - 0.04 X^2 \quad (2.1)$$

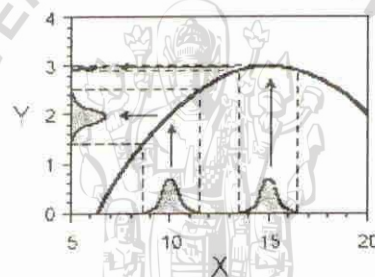
Plotting persamaan tersebut dapat dilihat pada gambar 2.1 dibawah ini.



Gambar 2.1 Pengaruh X terhadap Y

Sumber : Taylor , hal 1

Jika nilai X bervariasi disekitar target yang diinginkan dengan standar deviasi  $\sigma_X = 0.5$  maka bisa dipilih nilai X diantara 10 sampai 20. Jika diinginkan untuk mengidentifikasi target X yang akan meminimalkan Y maka gambar 2.2 berikut dapat mengilustrasikan secara lebih baik.

Gambar 2.2 *Robustness*

Sumber : Taylor , hal 2

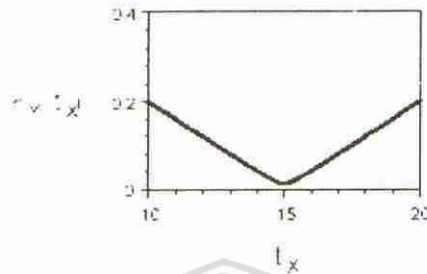
Dari grafik dapat dilihat bahwa untuk nilai X disekitar 10 maka didapatkan nilai Y lebih sensitif terhadap variasi karena kemiringan yang lebih tajam. Jika nilai X berada di sekitar 15 maka didapatkan nilai Y yang kurang sensitif terhadap variasi karena kemiringan yang lebih landai.

Dengan menurunkan persamaan bagi standar deviasi Y dan kemudian mencari target X yang meminimalisasi persamaan tersebut akan menghasilkan desain yang *robust*. Untuk menurunkan persamaan tersebut, dapat dipakai buku-buku teks yang menyediakan beberapa persamaan dasar. Persamaan deviasi

standar dapat dicari dengan memakai metode *tolerance analysis*. Menggunakan metode ini maka standar deviasi dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\sigma_y(t_x) = \sqrt{(1.2 - 0.08t_x)^2 \sigma_x^2 + 0.0032 \sigma_x^4} \quad (2.2)$$

Plotting persamaan ini akan menghasilkan grafik 2.3 berikut ini.



Gambar 2.3 Plotting  $\sigma_y(t_x)$

Sumber : Taylor , hal 2

Jika persamaan yang menghubungkan X dan Y tidak diketahui, maka harus diestimasi dengan melalui pengumpulan dan analisis data. Dalam pengumpulan dan analisis data ini ada beberapa pendekatan yang bisa dipakai dalam mencapai sebuah desain yang *robust* yang beberapa diantaranya disebutkan berikut ini.

### 2.3.1 Dual response approach

Metode ini dilakukan dengan menjalankan studi *response surface* dimana rata-rata dan deviasi standar dari keluaran dianalisis. Persamaan yang didapat selanjutnya digunakan untuk meminimalkan variasi sambil berusaha mendapatkan nilai rata-rata yang diinginkan.

Dengan memakai persamaan diatas maka dapat disusun suatu rancangan percobaan dan data yang didapat ditabelkan berikut pada tabel 2.1 berikut ini.



Tabel 2.1 Data bagi Pendekatan *Dual Response*

Sumber : Taylor , hal 2

Target	Nilai Y			
10	2.34	2.03	2.02	2.21
	2.20	1.67	1.99	2.17
	2.09	1.87	2.21	1.39
15	3.00	3.00	3.00	2.97
	2.98	3.00	2.99	3.00
	3.00	2.99	3.00	3.00
20	1.72	2.19	2.04	1.93
	2.03	1.80	2.13	1.65
	1.94	1.87	1.90	2.09

Setelah data terkumpul, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai rata-rata dan standar deviasi tiap target. Nilainya ditunjukkan dalam tabel 2.2 berikut ini.

Tabel 2.2 Perkiraan Harga Nilai Rata-rata dan Standar Deviasi

Sumber : Taylor , hal 3

Target	Nilai rata-rata	Standar Deviasi
10	2.0158333	0.2657907
15	2.9941667	0.0099620
20	1.9408333	0.1645632

Dengan memakai analisis regresi berdasarkan polinomial kuadrat maka koefisien persamaan :

$$b_0 + b_1 t_x + b_2 t_x^2 \quad (2.3)$$

diperkirakan sebesar

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} \hat{b}_0 \\ \hat{b}_1 \\ \hat{b}_2 \end{bmatrix} = (X' X)^{-1} X' Y \quad (2.4)$$

sehingga persamaan polinomial untuk ketiga target tersebut adalah :

$$X = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 \\ 1 & t_2 & t_2^2 \\ 1 & t_3 & t_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 10 & 100 \\ 1 & 15 & 225 \\ 1 & 20 & 400 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Y merupakan matriks data. Bisa juga dipakai bentuk logaritmik dari Y, karena biasanya bentuk logaritmik cocok untuk persamaan polinomial, yang jika dikembalikan untuk mendapatkan standar deviasi didapat Y :

$$Y = \begin{bmatrix} \log(0.2657907) \\ \log(0.0099620) \\ \log(0.1645632) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Sehingga persamaan hasil untuk nilai rata-rata dan standar deviasi dari Y adalah :

$$\hat{\mu}_Y(t_x) = -6.03583 + 1.2115t_x - 0.0406333t_x^2 \quad (2.7)$$

$$\hat{\sigma}_Y(t_x) = e^{(23.5082 - 3.70101t_x + 0.121769t_x^2)} \quad (2.8)$$

Secara umum sebagian besar persoalan memuat beberapa masukan. Dalam banyak kasus, input yang berpengaruh besar terhadap variasi harus diminimalkan. Dan masukan lainnya ditarget untuk mencapai rata-rata yang diinginkan. Kasus lain, fungsi obyektif dioptimisasi untuk mendapatkan kombinasi terbaik dari nilai rata-rata dan variasi. Perkiraan minimalisasi target terhadap variasi, dinyatakan sebagai  $\hat{t}_{\min}$  dapat dihasilkan dengan turunan parsial dari persamaan 2.8 dengan memperhatikan  $t_x$  mengusahakannya menjadi nol dan kemudian menyelesaikannya akan didapatkan :

$$\hat{t}_{\min} = \frac{-\hat{b}_1}{2\hat{b}_2} = 15.197 \quad (2.9)$$

Persamaan ini akan menghasilkan nilai yang minimum sepanjang nilai yang berada di daerah yang diinvestigasi dengan nilai  $b_2$  positif.

### 2.3.2 Taguchi approach (inner/outer array approach)

Pendekatan Taguchi memakai noise array untuk mensimulasi variasi input. Untuk menyelesaikan persamaan diatas misalnya diambil 4 sampel yang mewakili setiap target (diambil nilai-nilai 9.5, 10.0, 10.5, 14.5, 15.0, 15.5, 19.5, 20.0, 20.5). Pendekatan ini disebut juga pendekatan *inner/outer array approach*. Target

dipakai mewakili semua kombinasi yang mungkin dari *inner array* I dan *outer array* O. Nilai estimasi  $\sigma_x$  diperlukan untuk merancang pembahasan.

$$I = \begin{bmatrix} 10 \\ 15 \\ 20 \end{bmatrix} \text{ dan } O = \begin{bmatrix} +\sigma_x \\ +0 \\ -\sigma_x \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Sedangkan nilai pengamatan dari studi yang dilakukan dapat dilihat pada tabel 2.3 berikut ini.

Tabel 2.3 Data untuk Pendekatan Taguchi 1

Sumber : Taylor , hal 3

Target	Nilai-nilai Y			
9.5	2.09	1.99	1.82	1.67
10.0	2.26	1.64	1.98	1.89
10.5	2.23	2.47	1.93	2.30
14.5	2.99	2.99	2.99	2.95
15.0	2.98	2.98	2.98	2.96
15.5	3.00	2.97	3.00	2.96
19.5	2.24	2.24	2.05	2.33
20.0	2.10	2.04	1.80	1.90
20.5	1.74	1.88	2.15	1.65

Setelah data diatas didapat, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai rata-rata di tiap target. Hasilnya didapatkan pada tabel 2.4 berikut ini.

Tabel 2.4 Data untuk Pendekatan Taguchi 2

Sumber : Taylor , hal 4

		Inner Array		
		- 0.5	+ 0	+ 0.5
Outer Array	10	1.8925	1.9425	2.2325
	15	2.9800	2.9750	2.9825
	20	2.2150	1.9600	1.8550

Kemudian nilai-nilai rata-rata dan standar deviasi Y untuk tiap outer array didapatkan seperti tabel 2.5



Tabel 2.5 Harga Nilai Rata-rata dan Standar Deviasi dari Y

Sumber : Taylor , hal 4

Target	Rata-rata	Standar Deviasi
10	2.0225	0.1835756
15	2.9792	0.0038189
20	2.0100	0.1851350

Polinom pangkat dua kemudian dipakai untuk menyusun persamaan yang bersesuaian dengan tabel 2.4 diatas sehingga didapat nilai rata-rata dan standar deviasi Y sebagai berikut :

$$\hat{\mu}_Y(t_x) = -5.6686 + 1.15429t_x - 0.038518t_x^2 \quad (2.11)$$

$$\hat{\sigma}_Y(t_x) = e^{(23.3036 - 4.65923t_x + 0.155036t_x^2)} \quad (2.12)$$

nilai  $t_x$  yang meminimalisasi persamaan diatas di daerah yang sedang diteliti diberikan oleh :

$$\hat{t}_{\min} = \frac{-\hat{b}_1}{2\hat{b}_2} = 14.997 \quad (2.13)$$

### 2.3.3 Pendekatan *Tolerance Analysis*

Metode *tolerance analysis* diawali oleh studi tentang respons permukaan pada rata-rata keluaran (*output average*) yang dilanjutkan dengan melakukan analisis toleransi (*tolerance analysis*) menggunakan persamaan rata-rata yang telah diprediksi sebelumnya. Pada pendekatan ini, hanya menggunakan persamaan nilai rata-rata dan mengabaikan persamaan standar deviasi. Dalam pengumpulan data, metode yang dipakai sangat mirip dengan metode yang dipakai pada pendekatan *dual response* sehingga untuk menentukan persamaan nilai rata-rata bisa dipakai kembali persamaan 2.7 diatas. *Tolerance analysis* kemudian dapat dipakai untuk menentukan nilai  $\hat{\sigma}_Y(t_x)$ . Hasilnya dapat dilihat pada persamaan 2.14 berikut ini.

$$\sigma_Y(t_x) = \sqrt{(1.2115 - 0.0812666t_x)^2 \sigma_x^2 + 0.0033021 \sigma_x^4} \quad (2.14)$$

Perkiraan harga  $\sigma_x$  sangat dibutuhkan agar analisis menjadi lengkap. Untuk itu diperlukan estimasi nilai  $t_x$  agar persamaan 2.14 menjadi minimum.

$$\hat{t}_{\min} = \frac{-\hat{b}_1}{2\hat{b}_2} = 14.908 \quad (2.15)$$

900542

#### 2.4 Sumber Noise (Gangguan)

Secara umum ada tiga tipe *noise* yang sering muncul yaitu :

1. *External noise factors* yang berasal dari luar produk.
2. *Unit-to-unit noise*, karena operasi manufaktur.
3. *Internal noise*, karena penurunan unjuk kerja produk (*deterioration*), umur dan keausan.

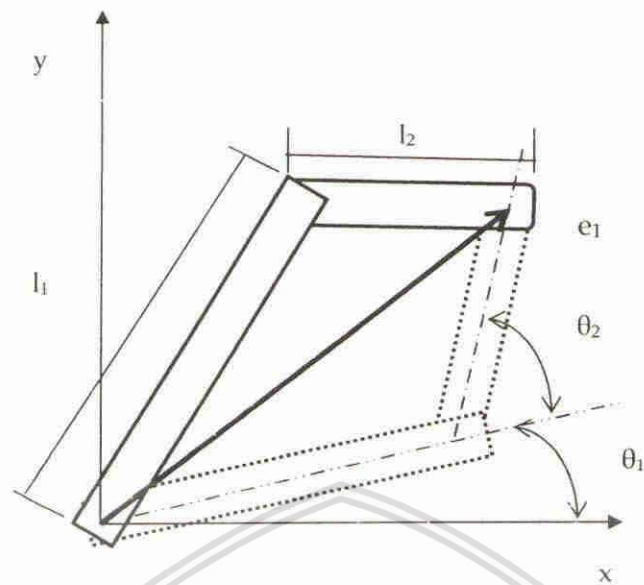
Sedangkan kegagalan yang sering timbul pada operasi sebuah produk adalah sebagai berikut :

1. *Start up failure*, karena cacat produksi.
2. *Random failure*, karena faktor lingkungan.
3. *End-of-life failures*, karena penurunan unjuk kerja produk.

Meskipun demikian, *noise* yang paling sering ditemui dalam operasi produk adalah *external noise faktor*. *Noise* ini bisa diatasi dengan berbagai cara seperti menggunakan semacam kontrol umpan balik, tetapi jika ini dilakukan akan menambah ongkos dan kerumitan produk

#### 2.5 Manipulator 2R

Manipulator tipe 2R seperti yang terlihat pada gambar 2.4 di bawah ini sangat sering dijadikan model dalam kajian dasar dalam robotika. Manipulator tipe ini menghasilkan persamaan kinematik dan dinamik yang masih sederhana sehingga cukup mudah penyelesaiannya tetapi dianggap mampu mewakili persoalan yang ada dalam bidang robotika.



Gambar 2.4 Posisi ujung lengan dan vektor kartesian, yang bersesuaian

Dalam kajian tentang robotika, selalu dipakai matriks untuk mewakili kinematika maupun dinamika robot. Seperti pada gambar 2.4 posisi ujung lengan (E) dinyatakan dalam vektor.

## 2.6 Persoalan Desain *Robust* pada Manipulator

Sebuah lengan manipulator selalu diharapkan mempunyai akurasi yang memadai dalam mencapai *goal point* (titik tujuan). Akurasi lengan manipulator dipengaruhi oleh banyak hal antara lain :

- Kepresisian parameter yang muncul dalam persamaan *inverse kinematic*
- Pemberian toleransi yang memadai.

Dalam penelitian ini, akurasi yang dipengaruhi oleh pemberian toleransi yang memadai menjadi topik pembahasan. Hal ini tidak terlepas dari kenyataan bahwa toleransi yang semakin tinggi akan menyebabkan biaya produksi yang semakin tinggi pula sehingga toleransi yang diberikan dipandang perlu untuk dioptimasi.



Rancangan yang *robust* juga menjadi sesuatu yang diharapkan dari lengan manipulator. Ini dikarenakan sebuah rancangan yang *robust* akan mampu mengatasi penurunan unjuk kerja rancangan akibat variasi-variasi yang mungkin timbul. Dalam usaha mendapatkan rancangan yang *robust*, berbagai metode telah diusulkan. Salah satunya adalah metode *robustness index* yang diaplikasikan dalam penelitian ini.

Karena yang dibahas adalah akurasi *end-effector* lengan manipulator dalam mencapai titik tujuan, maka dibagian awal akan disajikan beberapa hal yang berhubungan dengan *workspace* manipulator dan beberapa hal yang berhubungan dengan akurasi lengan manipulator. Selanjutnya akan dibahas pula tentang metode *robustness index* dalam usaha untuk mendapatkan dimensi manipulator yang optimal.

#### 2.6.1 Kuantifikasi Atribut *Workspace* Lengan Manipulator 2 Link

Dalam pembahasan tentang *workspace* manipulator dikenal dua macam *workspace* yaitu :

- Dextrous workspace* yaitu volume ruang yang dapat dicapai oleh *end-effector* robot dengan semua orientasi.
- Reachable workspace* yaitu volume ruang yang dapat dicapai oleh *end-effector* robot dengan minimal satu orientasi.

Titik-titik yang berada di daerah antara batas terluar *reachable workspace* dan batas terluar *dextrous workspace*, dinamakan titik *singular*, dimana pada daerah ini lengan manipulator sulit untuk bergerak secara seragam dan memberikan gaya yang seragam di semua arah. Akibatnya daerah ini sering dihindari. Secara matematis, konfigurasi *singular* ini dinyatakan dalam :

$$\det(J(\Theta))=0 \quad (2.16)$$

sehingga determinan Jacobian diatas juga otomatis berfungsi sebagai ukuran *dexterity* manipulator.

### 2.6.2 Persoalan Kepresisian Posisi Lengan Manipulator

Metode yang dipakai sebagian besar manipulator dalam mencapai titik tujuannya dewasa ini adalah dengan metode diajari (melalui *teaching pendant* misalnya). Metode ini dilakukan dengan mengerakkan manipulator ke posisi yang dituju dan kemudian posisi tersebut disimpan dalam penyimpanan data sensor posisi dan sudut *joint*. Metode ini, yang juga disebut "*teach and playback*", menyebabkan persoalan *inverse kinematics* tidak pernah muncul karena titik tujuan tidak pernah dinyatakan dalam koordinat Kartesian. Kemampuan sebuah robot manipulator untuk menuju titik tujuan dengan tepat secara berulang dalam kasus semacam ini dinamakan *repeatability*.

Di lain metode, manipulator bergerak ke titik tujuan yang dinyatakan dalam koordinat Kartesian. Untuk bisa melakukan hal ini kontroler manipulator harus mampu melakukan perhitungan *inverse kinematics* agar didapat sudut *joint*. Kepresisian *end-effector* dalam mencapai titik tujuan (hasil perhitungan *inverse kinematics*) dinamakan *accuracy* manipulator. *Accuracy* sangat dipengaruhi oleh *repeatability* dan kepresisian parameter yang muncul dalam persamaan kinematik manipulator. Dalam bidang robotika, *repeatability* biasanya tidak menjadi masalah (bagus) tetapi *accuracy* bisa bervariasi dari satu manipulator ke manipulator yang lain.

Selain masalah kinematika, *accuracy* lengan robot juga dipengaruhi oleh dimensi lengan robot. Sebuah dimensi, biasanya dinyatakan dalam dua bagian yaitu ukuran nominal dan toleransi. Bagi desainer dan staf manufaktur, yang menjadi perhatian utama dalam dimensi ini adalah toleransi. Akibatnya spesifikasi toleransi menjadi sesuatu yang sangat diperhatikan oleh desainer dan staf manufaktur.

Berdasarkan gambar 2.3 dibawah, untuk sebuah manipulator tipe 2R tertentu daerah kerja yang harus bisa dicapai oleh lengan dinyatakan dalam himpunan :

$$S_T = \{ P_1, P_2, \dots, P_n \} \quad (2.17)$$

dengan :  $S_T$  = daerah kerja lengan robot.

$P_n$  = posisi yang diinginkan.

sehingga dengan sendirinya ujung lengan ( $E_i$ ) harus bisa mencapai  $P_n$  dengan akurasi seperti yang diharapkan. Ujung lengan ( $E_i$ ) juga bisa diwakili oleh  $e_i$  yang merupakan vektor kartesian dari posisi ujung lengan sesungguhnya pada posisi ke- $i$  dan didefinisikan sebagai berikut :

$$e_i = l_1 \begin{bmatrix} C_{\theta_{1i}} + S_{\theta_{1i}} \end{bmatrix}^T + l_2 \begin{bmatrix} C_{\theta_{1i} + \theta_{2i}} S_{\theta_{1i} + \theta_{2i}} \end{bmatrix}^T \quad (2.18)$$

## 2.7 Metode Robustness Index

Metode *robustness index* dilakukan dengan melakukan dua tahapan yaitu yang pertama adalah tahap penghitungan dimensi mekanisme dengan memakai *robustness index*. Tahap kedua adalah menghitung dimensi mekanisme dengan *tolerance analysis methods* dengan memakai dasar yang dilakukan di langkah pertama. Ada beberapa pilihan *robustness index* yang bisa dipakai yang diantara dapat dilihat di bawah ini.

### Robustness Index 1 ( $RI_1$ )

*Robustness Index 1* seperti yang dinyatakan berikut ini

$$RI_1 = \frac{\|J\|_2 \|J^{-1}\|_2}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.19)$$

Jika  $RI_1$  mempunyai nilai yang minimum, maka desain dikatakan *robust*.  $\|J\|_2$  merupakan *Euclidian Norm* dan  $\|J^{-1}\|_2$  merupakan *Inverse Euclidian Norm* yang didefinisikan sebagai berikut :

$$\|J\|_2 = \sqrt{(J, J)} = \sqrt{J^T J} = \sqrt{J_1^2 + J_2^2 + \dots + J_n^2} \quad (2.20)$$

dan

$$\|J^{-1}\|_2 = \sqrt{(J^{-1}, J^{-1})} = \sqrt{(J^{-1})^T J^{-1}} = \sqrt{(J^{-1})_1^2 + (J^{-1})_2^2 + \dots + (J^{-1})_n^2}$$



(2.21)

Dengan :

$$J_x = \begin{bmatrix} J_{x_i} \\ \vdots \\ J_{x_k} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$J_{x_i} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{1i}) & \cos(\theta_{1i} + \theta_{2i}) \\ \sin(\theta_{1i}) & \sin(\theta_{1i} + \theta_{2i}) \end{bmatrix}, \quad i \in [1, k] \quad (2.23)$$

### Robustness Index 2 (RI<sub>2</sub>)

RI<sub>2</sub> didefinisikan sebagai  $RI_2 = \|J\|_2 = \sigma_{\max}$  yang merupakan nilai singular maksimum dari matriks  $J_x$  dan berhubungan dengan *norm* maksimum dari kesalahan pemosisian  $E$ ,  $\|\delta f\|_{\max}$ , ketika *norm* variasi dimensionalnya uniter yakni untuk keadaan  $\delta l_1^2 + \delta l_2^2 = 1$ .

$$\|J\| = \sqrt{(J, J)} = \sqrt{J^T J} = \sqrt{J_1^2 + J_2^2 + \dots + J_n^2} \quad (2.24)$$

Pernyataan aljabar dari RI<sub>2</sub> dapat dilihat pada persamaan berikut ini :

$$RI_2 = \sqrt{n + \sum_{i=1}^n \cos \theta_{2i}} = \sqrt{n + \left| \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2 + y_i^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right|} \quad (2.25)$$

### Robustness Index 3 (RI<sub>3</sub>)

Robustness Index 3 dinyatakan dalam :

$$RI_3(J) = \|J\|_2 + \|J\|_{Frob} \quad (2.26)$$

### Syarat Batas

Dalam kasus yang sedang dikaji (untuk *workspace* tertentu), penyelesaian dari persoalan *robust design* tersebut adalah :

$$\begin{cases} |l_1 - l_2| \leq r \\ l_1 + l_2 \geq R \end{cases} \quad (2.27)$$

dan toleransi yang diberikan sebesar :

$$\Delta l_1 + \Delta l_2 \leq \varepsilon_E \text{ mm} \quad (2.28)$$

### 2.7.1 Penentuan variabel *robust design*

Variabel yang harus ditentukan dalam persoalan *robust design* diberikan dalam tiga himpunan seperti berikut ini :

1. Himpunan *design variable* (DV) yang nilai nominalnya dapat dipilih dari batas atas dan bawah. Variabel ini termasuk variabel terkontrol. Secara matematis DV dituliskan dalam matriks berdimensi  $l$  sebagai berikut :

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_l]^T \quad (2.29)$$

2. Himpunan *design parameter* (DP) yang tidak dapat diubah oleh perancang. Variabel ini termasuk variabel tak terkontrol. Secara matematis DP dituliskan dalam matriks berdimensi  $m$  sebagai berikut :

$$p = [p_1, p_2, \dots, p_m]^T \quad (2.30)$$

3. Dan himpunan *performance function* yang secara matematis dituliskan dalam matrik berdimensi  $n$  sebagai berikut :

$$f = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T \quad (2.31)$$

Sebuah sistem dikatakan *robust* jika unjuk kerjanya tidak sensitif terhadap variasi yang mungkin terjadi. Secara matematis  $f$  akan tergantung terhadap  $x$  dan  $p$  atau secara matematis ditulis :

$$f = f(x, p) \quad (2.32)$$

DV dan DP seharusnya independen (tidak tergantung). Variasi di  $f$

$\delta f = [\delta f_1, \dots, \delta f_n]^T$ , dihitung dengan memakai terminologi orde pertama dari deret Taylor dari fungsi  $f$  sebagai berikut :

$$\delta f_i = \sum_{j=1}^l \left[ \frac{\delta f_i(x, p)}{\delta x_j} \right] \delta x_j + \sum_{j=1}^m \left[ \frac{\delta f_i(x, p)}{\delta p_j} \right] \delta p_j, i \in [1, n] \quad (2.33)$$

Studi tentang sensitivitas sistem terhadap variasi didasarkan pada teori distribusi sensitivitas unjuk kerja seperti yang dinyatakan dalam persamaan (2.33) dapat dinyatakan dalam matriks sebagai berikut :

$$\delta f = \begin{bmatrix} J_x & J_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x^T & \delta p^T \end{bmatrix}^T = J \delta X \quad (2.34)$$

dengan :  $\delta x$  = variasi pada DV.

$\delta p$  = variasi pada DP.

$J_x$  = matriks Jacobian ( $n \times l$ ) dengan memperhatikan  $x$ .

$J_p$  = matriks Jacobian ( $n \times m$ ) dengan memperhatikan  $p$ .

Teori ini menjelaskan bahwa matriks Jacobian  $J$  mendeskripsikan pengaruh variasi komponen terhadap unjuk kerja sistem dimana  $J_x = \delta f / \delta x$ ,  $J_p = \delta f / \delta p$ ,  $J = \begin{bmatrix} J_x & J_p \end{bmatrix}$ ,  $X^T = \begin{bmatrix} x^T & p^T \end{bmatrix}$ .  $\delta x$  dan  $\delta p$  merupakan variasi dalam DV dan DP.  $J_x$  dan  $J_p$  secara berurutan adalah matriks Jacobian sensitivitas  $f$  terhadap  $x$  dan matriks Jacobian sensitivitas  $f$  terhadap  $p$ . Jika variasi dalam DV tidak dihitung, maka  $J = J_p$  dan  $X = p$ . Sebaliknya jika variasi dalam DP tidak dihitung, maka  $J = J_x$  dan  $X = x$ . Dalam usaha untuk membuat desain menjadi *robust*, maka  $\|\delta f_2\|$  sebagai normal variasi dalam  $f$  diminimalisir meskipun dalam setiap parameter  $f_i$  tidak termnimalisir.  $\|\delta f_2\|$  diberikan oleh persamaan :

$$\|\delta f_2\| = \delta f^T \delta f = \delta x^T S \delta x \quad (2.35)$$

dengan  $S = J^T J$ . Jika diasumsikan bahwa variasi dalam DV diabaikan, maka  $J = J_p$  dan  $S$  merupakan matriks simetris ( $m \times m$ ). Sehingga  $S$  dapat didiagonalkan seperti di bawah ini.

$$S = Q \text{diag}(\lambda_i) Q^T, Q = [q_1, \dots, q_i, \dots, q_m], i \in (1, m) \quad (2.36)$$

$\lambda_i$  adalah nilai eigen dari  $S$  dan  $q_i$  merupakan vektor eigen yang bersesuaian. jika  $\delta p$  dinyatakan dengan  $r$  dalam sistem koordinat yang dibentuk oleh vektor eigen  $q_i$  maka:



$$\delta p = Q r = Q [r_1 \dots r_m]^T \quad (2.37)$$

Sedangkan *Euclidian norm* dari variasi unjuk kerja  $f$  setara dengan :

$$\|\delta f\|_2 = \sqrt{\lambda_1 r_1^2 + \dots + \lambda_m r_m^2} \quad (2.38)$$

dan sensitivitas  $S$  desain terhadap variasi dapat didefinisikan sebagai :

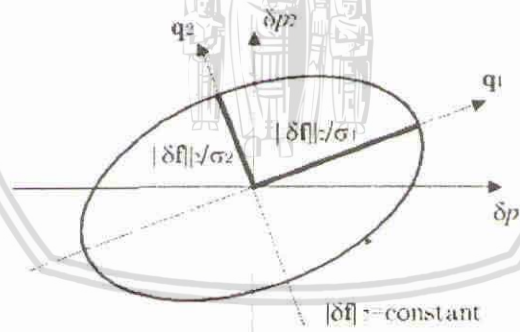
$$S = \frac{\|\delta f\|_2}{\|\delta p\|_2} = \sqrt{\frac{\lambda_1 r_1^2 + \dots + \lambda_m r_m^2}{r_1^2 + \dots + r_m^2}} \quad (2.39)$$

dengan asumsi  $\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_m$ ,  $S$  berada di antara,  $\sigma_1 = (\lambda_1)^{1/2}$  yang merupakan harga terkecil nilai singular  $J$  dan  $\sigma_m = (\lambda_m)^{1/2}$  yang merupakan harga terbesar nilai singular  $J$  sehingga :

$$\sigma_1 \leq S \leq \sigma_m \quad (2.40)$$

sehingga semakin kecil harga terbesar nilai singular  $J$ , desain akan semakin *robust*.

Distribusi unjuk kerja terkarakterisasi dalam ruang variasi (*variation space*) melalui nilai eigen (*eigen values*) dan vektor eigen (*eigen vector*) yang membentuk bangun ruang hiperelipsoidal seperti dinyatakan dalam persamaan 11 dan digambarkan dalam gambar 1 di bawah ini.



Gambar 2.5 Elipsoidal sensitivitas desain

Sumber : Caro, hal 87

Dalam gambar diatas, sensitivity ellipsoidal hanya ditentukan oleh dua parameter desai yaitu  $p_1$  dan  $p_2$ . Sedangkan  $\sigma_1$  dan  $\sigma_2$  adalah nilai singular terkecil dan terbesar dari  $J$  dan  $q_1$  dan  $q_2$  adalah vektor eigen yang bersesuaian.

Sedangkan  $\|\delta f\|_2$  adalah *Euclidian norm of variation* untuk unjuk kerja dan  $\|\delta X\|_2$  adalah *Euclidian norm of variation* dalam DV dan DP.

Sebuah mekanisme dikatakan *robust* jika sensitivitas  $S$  dari variasi unjuk kerjanya adalah minimum yang persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\sigma_{\min} \leq S = \frac{\|\delta f\|_2}{\|\delta X\|_2} \leq \sigma_{\max} \quad (2.41)$$

dengan :  $\sigma_{\min}$  = nilai singular matriks sensitivitas terkecil.

$\sigma_{\max}$  = nilai singular matriks sensitivitas terbesar.

### 2.7.2 Pemilihan *robustness index* yang cocok

Desain dikatakan *robust* jika sensitivitas terhadap variasi minimum. Jika dipakai rumusan di sub bab sebelumnya, sebuah desain dikatakan *robust* jika  $S$  minimum. Dari persamaan (12) diketahui bahwa  $S$  tergantung kepada DP yang tidak diketahui. Akibatnya tidak dimungkinkan untuk meminimalisasi  $S$  secara langsung, sehingga perlu perkiraan dalam menentukan *robustness index* sebuah desain.

Beberapa peneliti menggunakan pendekatan yang berbeda-beda dalam mencari perkiraan tersebut. Beberapa peneliti menggunakan *condition number* dari matriks Jacobian sensitivitas  $J$ ,  $\kappa(J)$ , sebagai *robustness index* seperti al-Widyan dan Ting. *Condition number* yang dipakai adalah rasio antara nilai singular terbesar dan nilai singular terkecil. Sebuah desain dikatakan *robust* jika  $\kappa(J)$  minimum. Dari persamaan (13) dapat diketahui bahwa dalam usaha untuk meminimumkan  $\kappa(J)$  maka lebih baik memperkecil nilai singular terbesar  $\sigma_m$  dari matriks  $J$  dari pada memperkecil  $\delta p$  seperti mengikuti persamaan (12).

Dalam penentuan *robustness index* ini, dipakai dasar *Euclidean norm* matriks  $J$  karena lebih cocok untuk dipakai (Zhu : 2001) daripada menggunakan *Frobenius norm*. Dalam penelitian ini dipakai  $RI_2$  terutama karena indeks tersebut lebih cocok dipakai dalam kasus desain mekanisme dibanding  $RI_1$  dan  $RI_3$  (Caro : 2005).

## 2.8 Metode Optimisasi Dimensi

Disamping menggunakan metode robustness index, pencarian tentang desain yang robust juga bisa dilakukan dengan metode optimisasi dimensi seperti yang akan disajikan berikut ini. Dengan mengetahui jangkauan variasi di DV dan DP maka tujuan metode ini adalah mendefinisikan nilai nominal DV dalam usaha untuk meminimalisasi variasi unjuk kerja sistem secara independen. Metode ini kebalikan dari metode eksplisit (robustness index) seperti yang diuraikan dalam sub bab 2.7.

Secara matematis metode tersebut dinyatakan secara matematis sebagai berikut :

$$\begin{cases} \min_x (\mu_{f_i}(x, p), \sigma_{f_i}(x, p)) & i=1, \dots, n \\ s.t. g_j(x, p) + \Delta g_j(x, p) \leq 0 & i=1, \dots, r \\ \Delta x, \Delta p \text{ tak diketahui} \end{cases} \quad (2.42)$$

dimana  $g_j$  dan  $\Delta g_j$  adalah konstrain ke  $j$  dan *band* yang bersesuaian.  $\Delta x$  dan  $\Delta p$  adalah *tolerance band* dari variabel desain  $x$  dan variabel parameter  $p$ . *Tolerance band* konstrain ke  $j$  dihitung secara matematis sbb :

$$\Delta g_j(x, p) = \sum_{i=1}^l \left| \frac{\partial g_j(x, p)}{\partial x_i} \right| \Delta x_i + \sum_{i=1}^m \left| \frac{\partial g_j(x, p)}{\partial p_i} \right| \Delta p_i \quad (2.43)$$

persamaan (19) diatas berbasis deret Taylor sehingga umumnya valid untuk toleransi yang kecil. Jika diinginkan untuk mengetahui nilai tengah dan standar deviasi dari parameter unjuk kerja ke  $i$  dari  $f_i$  maka persamman berikut bisa digunakan :

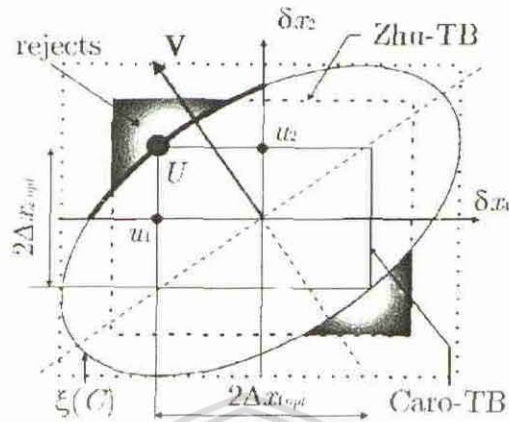
$$\sigma_{f_i}^2(x, p) = \sum_{j=1}^l \left| \frac{\partial f_i(x, p)}{\partial x_j} \right|^2 \sigma_{x_j}^2 + \sum_{j=1}^m \left| \frac{\partial f_i(x, p)}{\partial p_j} \right|^2 \sigma_{p_j}^2 \quad (2.44)$$

## 2.9 Metode tolerance analysis

Setelah *robustness index* didapatkan maka langkah berikutnya adalah memakai metode *tolerance analysis* yang didasarkan pada *tolerance box* terbesar yang



tidak memuat daerah tolak (Caro : 2005). *Tolerance box* ini dinamakan Caro-TB seperti terlihat pada gambar 2 berikut ini



Gambar 2.6 Tolerance Synthesis  $l=2$

Sumber : Caro, hal 89

Dalam mencari dimensi yang dimaksud maka langkah pertama yang dicari adalah nilai nominal  $\bar{x} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_l]$  dihitung berdasarkan robustness index  $RI_2$  dan kemudian toleransi dimensi optimalnya dihitung dengan menggunakan rumusan :

$$\begin{cases} \max_u \prod_{i=1}^l |u_i| \\ s.t \ U(u_1, u_2, \dots, u_l) \in \xi(C) \\ u_i \cdot \text{sign}(V_i) \geq 0, i=1, \dots, l \\ |u_i| \geq \Delta x_{i \min}, i=1, \dots, l \end{cases} \quad (2.45)$$

$$\Delta x_{i \text{ opt}} = |u_i|, \quad \bar{x} - \Delta x_{i \text{ opt}} \leq x_i \leq \bar{x}_i + \Delta x_{i \text{ opt}}, \quad i=1, \dots, l$$

Algoritma ini akan memaksimalkan *hypervolume* dari *tolerance box* termasuk di dalam  $\xi(C)$ .  $V$  merupakan vektor eigen yang berhubungan dengan nilai maksimum singular dari matriks Jacobian sensitivitas mekanis dan  $V_i$  adalah komponen ke- $i$ .

### 2.10 Menghitung Torsi yang Dibutuhkan Lengan Manipulator

Torsi yang dibutuhkan oleh lengan agar dapat bergerak dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut (Craig : 1989) :

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (2.46)$$

atau :

$$\tau = J^T(\theta)(M_x(\theta)\ddot{x} + V_x(\theta, \dot{\theta}) + G_x(\theta)) \quad (2.47)$$

dengan :  $J^T(\theta)$  = matriks Jacobian posisi.

$M_x(\theta)$  = matriks massa manipulator.

$V_x(\theta, \dot{\theta})$  = vektor sentrifugal dan Coriolis.

$G_x(\theta)$  = matriks gravitasi.

$\ddot{x}$  = percepatan manipulator.

Masing-masing komponen untuk menghitung torsi dinyatakan dalam :

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} l_1 s_2 & 0 \\ l_1 c_2 + l_2 & l_2 \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

$$M_x(\theta) = \begin{bmatrix} m_2 + \frac{m_1}{s_2^2} & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

$$V_x(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} -(m_2 l_1 c_2 + m_2 l_2) \dot{\theta}_1^2 - m_2 l_2 \dot{\theta}_2^2 - \left( 2 m_2 l_2 + m_2 l_1 c_2 + m_1 l_1 \frac{c_2}{s_2^2} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ m_2 l_1 s_2 \dot{\theta}_1^2 + l_1 m_2 s_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

$$G_x(\theta) = \begin{bmatrix} m_1 g \frac{c_1}{s_2} + m_2 g s_{12} \\ m_2 g c_{12} \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

yang bila dinyatakan dalam masing-masing lengan menjadi :

$$\begin{aligned} \tau_1 = & m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 l_1 l_2 c_2 (2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + (m_1 + m_2) l_1^2 \ddot{\theta}_1 - m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2^2 \\ & - 2m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m_2 l_2 g c_{12} + (m_1 + m_2) l_1 g c_1 \end{aligned} \quad (2.52)$$

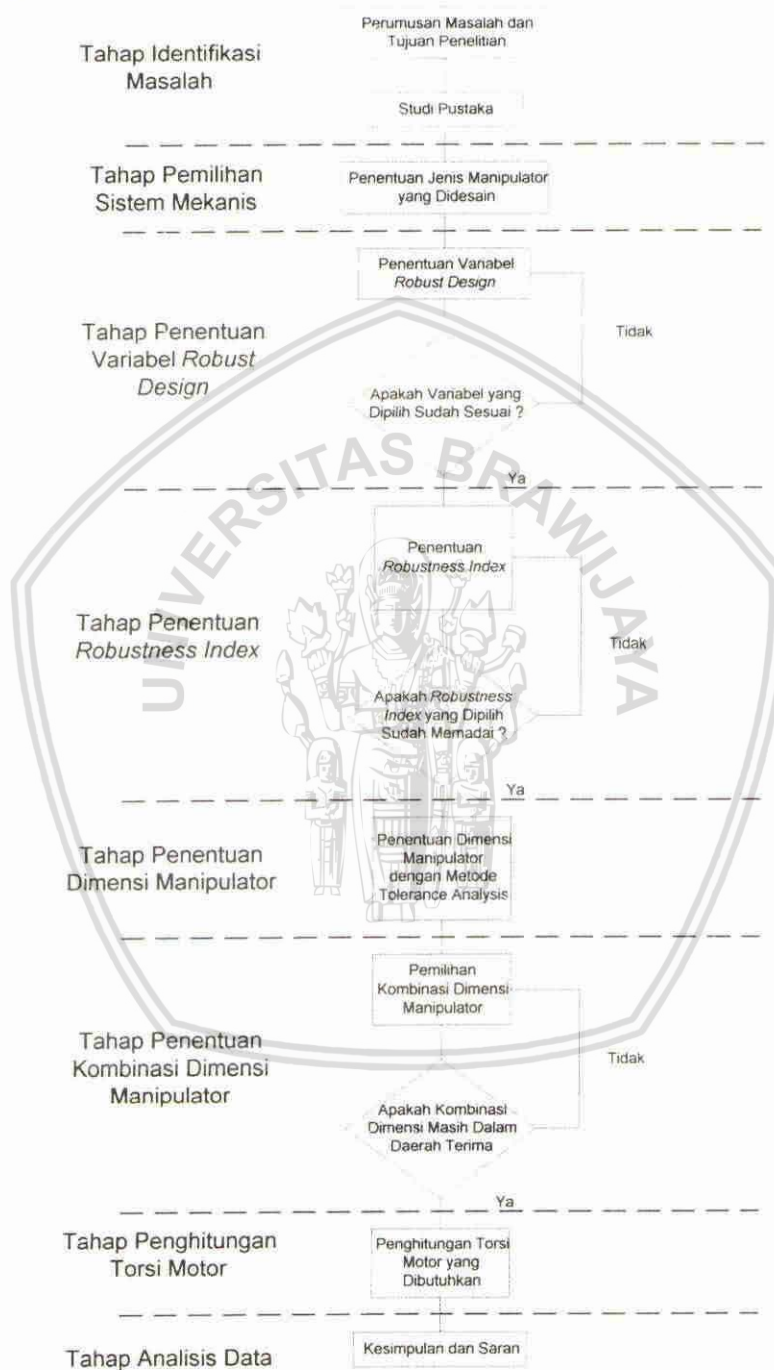
$$\tau_2 = m_2 l_1 l_2 c_2 \ddot{\theta}_1 + m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_1^2 + m_2 l_2 g c_{12} + m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \quad (2.53)$$





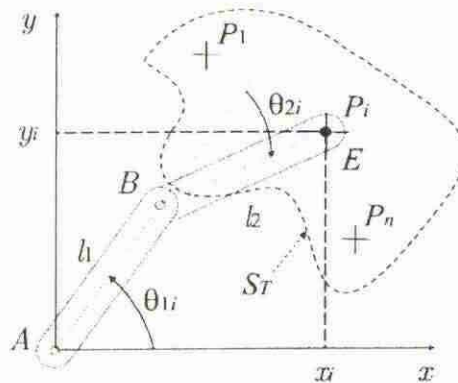
## BAB III METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini tercantum dalam langkah-langkah berikut ini :



Gambar 3.1 Metodologi Penelitian

Sedangkan manipulator yang dianalisis adalah tipe 2R dengan daerah kerjanya terlihat seperti di bawah ini.



Gambar 3.2 Manipulator 2R

Sumber : Caro, hal 89

Sedangkan rincian setiap tahapan adalah sebagai berikut :

a. Tahap Identifikasi Masalah

Dalam tahapan ini ditentukan perumusan masalah dan tujuan penelitian seperti yang ditulis pada Bab 1. Setelah perumusan masalah ditentukan, maka dilakukan studi literatur yang berhubungan dengan *robust design* dan perancangan manipulator.

b. Tahap Pemilihan Sistem Mekanis

Manipulator yang dipilih adalah manipulator tipe 2R. Juga ditentukan komponen-komponen yang membentuk manipulator ini.

c. Tahap Penentuan Variabel *Robust Design*

Variabel *robust design* yang akan dianalisis disini adalah :

1. *Design Variabel (DV)*

$$x = [l_1, l_2]^T \quad (3.1)$$

dengan  $l_1$  = panjang lengan 1.

$l_2$  = panjang lengan 2.

2. *Design Parameter (DP)*

$$p = [\sigma] = \emptyset \quad (3.2)$$

dengan :  $\sigma$  = variasi dalam proses manufaktur.

### 3. *Performance Function*

$$f = [e_1^T, \dots, e_i^T, \dots, e_n^T]^T \quad (3.2)$$

dengan :  $e_i$  = vektor kartesian posisi akhir manipulator

#### d. Tahap Penentuan *Robustness Index*

Dalam tahap ini perhitungan difokuskan pada pencarian *robustness index* (RI<sub>2</sub>) dengan memakai algoritma seperti persamaan (8).

#### e. Tahap Penentuan Dimensi Manipulator

Dalam tahap ini dicari dimensi manipulator yang optimal dengan mempertimbangkan beberapa kriteria yang dianggap sesuai dengan permasalahan seperti antara lain *dexterity* dari daerah kerja manipulator, *inertial ellipsoidal* maupun torsi yang dibutuhkan manipulator.

#### f. Tahap Penentuan Toleransi Dimensi Manipulator

Dalam tahap ini dicari *tolerance box* maksimum yang masih berada dalam elipsoidal dengan memakai persamaan (9).

#### g. Tahap Penentuan Kombinasi Dimensi Manipulator

Dalam tahapan ini dipilih beberapa kombinasi dimensi manipulator optimal sesuai dengan masing-masing kriteria yang dipakai di langkah ke e.

#### h. Tahap Penghitungan Torsi Motor

Dari grafik pemilihan kombinasi dimensi manipulator optimal pada tahapan sebelumnya, kemudian dihitung torsi yang diperlukan masing-masing kombinasi lengan tersebut.

#### i. Tahap Analisis Data

Pada tahapan ini akan ditentukan apakah masih ada kelemahan yang ada dan dibagian mana yang masih mungkin dilakukan agar tujuan penelitian dapat tercapai dan kemungkinan pemakaian metode lainnya dalam mengatasi kelemahan tersebut.



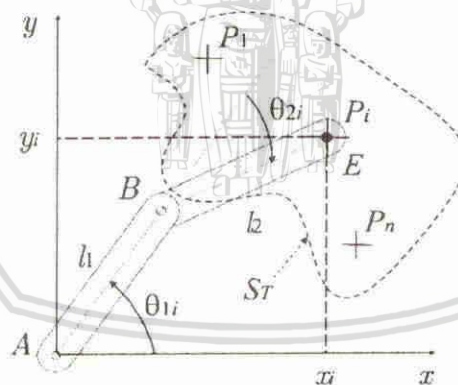
## BAB IV PENELITIAN

### 4.1 Tahap Pemilihan Sistem Mekanis

Manipulator yang dipilih adalah manipulator tipe 2R. Alasan pemilihan manipulator tipe 2R ini karena bisa mewakili sebuah sistem mekanis yang perlu dicari parameter desain dan toleransinya agar *robust* tetapi masih cukup mudah penyelesaiannya.

### 4.2 Manipulator 2R Dengan Daerah Kerja Tertentu

Sebuah manipulator dengan dua derajat kebebasan yang terdiri dari dua *revolute joint* mempunyai daerah kerja seperti pada gambar 4.1 di bawah ini. Diinginkan bahwa *end-effector* E dapat mencapai seluruh titik dalam daerah kerja  $S_T$  dan sedapat mungkin tidak sensitif terhadap variasi dimensional.



Gambar 4.1 Daerah kerja manipulator 2R

### 4.3 Penentuan Variabel *Robust Design* untuk Manipulator 2R Dengan Daerah Kerja Tertentu

Variabel *robust design* yang akan dianalisis disini adalah :

1. *Design Variabel (DV)*

$$x = [l_1, l_2]^T \quad (4.1)$$

dengan  $l_1$  = panjang lengan 1.

$l_2$  = panjang lengan 2.

2. *Design Parameter (DP)*

$$p = \emptyset \quad (4.2)$$

dikarenakan tidak ada parameter desain yang mempengaruhi hasil.

3. *Performance Function*

$$f = [e_1^T, \dots, e_i^T, \dots, e_k^T]^T \quad (4.3)$$

dengan :  $e_i$  = vektor kartesian posisi akhir manipulator

### 4.4 Tahap Penentuan *Robustness Index*

Dalam penelitian ini dipakai  $RI_2$ .

### 4.5 Studi Kasus

#### 4.5.1 Daerah Kerja Dibatasi oleh 4 Buah Titik (Caro : 2005)

#### Dimensi manipulator berdasarkan kondisi batas

Agar E (*end-effector*) dapat mencapai semua titik di  $S_T$ , maka syarat berikut harus terpenuhi oleh  $l_1$  dan  $l_2$ .

$$\begin{cases} |l_1 - l_2| \leq r \\ l_1 + l_2 \geq R \end{cases} \quad (4.4)$$

dengan  $r = \min_i d(A, P_i)$ ,  $R = \max_i d(A, P_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$  dan  $d(A, P_i)$  merupakan jarak dari *base* manipulator ke  $P_i$ . Misalnya  $S_T$  yang dikaji

dibatasi oleh titik-titik  $P_1 (1, 5)$ ,  $P_2 (2,7)$ ,  $P_3 (3,7)$  dan  $P_4 (4,6)$  maka  $r = \sqrt{26}$  dan  $R = \sqrt{58}$  (Caro : hal 90).

Dari syarat  $|l_1 - l_2| \leq r$  maka diselesaikan sebagai berikut :

$$l_1 - l_2 \leq \sqrt{26} \leq l_1 - l_2 \text{ dengan penyelesaian}$$

$$l_1 - l_2 \leq \sqrt{26} \quad \text{dan} \quad -\sqrt{26} \leq l_1 - l_2$$

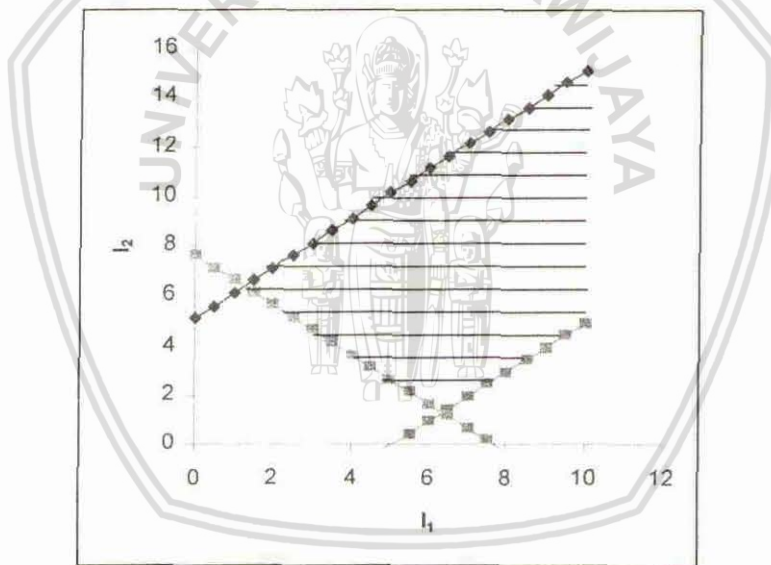
$$l_2 \geq l_1 - \sqrt{26} \quad l_2 \leq l_1 + \sqrt{26}$$

Dari syarat  $l_1 + l_2 \geq R$  maka diselesaikan sebagai berikut :

$$l_1 + l_2 \geq \sqrt{58}$$

$$l_2 \geq \sqrt{58} - l_1$$

Jika syarat tersebut digambarkan dalam koordinat  $l_1$ - $l_2$ , maka dapat dilihat seperti pada gambar 4.3 berikut ini.



Gambar 4.2 Plotting Kondisi Batas Kasus 1

Daerah yang memenuhi kondisi batas adalah daerah yang diarsir. Karena itu akan banyak sekali  $l_1$  dan  $l_2$  yang memenuhi kondisi batas diatas. Untuk menentukan dimensi manipulator yang optimal maka harus dipakai kriteria lain untuk menentukannya seperti yang akan dibahas di sub bab berikut ini.



### Dimensi manipulator berdasarkan $RI_2$

$RI_2$  yang minimum akan membuat rancangan lengan manipulator menjadi *robust*. Secara aljabar,  $RI_2$  dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$RI_2 = \sqrt{n + \left| \sum_{i=1}^n \cos \theta_{2i} \right|} \quad (4.5)$$

atau

$$RI_2 = \sqrt{n + \left| \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2 + y_i^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right|} \quad (4.6)$$

Dari persamaan (4.5) didapatkan bahwa  $RI_2$  (*global positioning error*) akan minimum jika  $\cos \theta_{2i}$  mendekati nol (0). Atau dengan kata lain kedua lengan manipulator dalam posisi hampir tegak lurus satu sama lain. Nilai  $RI_2$  yang memenuhi persamaan (4.5) dan (4.6) adalah dua (2).

Penguraian persamaan (4.6) akan menghasilkan :

$$(RI_2)^2 = \left( \sqrt{n + \left| \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2 + y_i^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right|} \right)^2 \quad (4.7)$$

$$(RI_2)^2 = \left( n + \left| \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2 + y_i^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right| \right) \quad (4.8)$$

$$(RI_2)^2 = n + \left| n \frac{-l_1 - l_2}{2l_1 l_2} \sum_{i=1}^n x_i^2 + y_i^2 \right| \quad (4.9)$$

Sesuai dengan syarat dari persamaan 4.6 maka  $RI_2 = \sqrt{n}$  sehingga :

$$0 = \left| n \frac{-l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \sum_{i=1}^n x_i^2 + y_i^2 \right| \quad (4.10)$$

$$l_1^2 + l_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 + y_i^2 \quad (4.11)$$

atau :

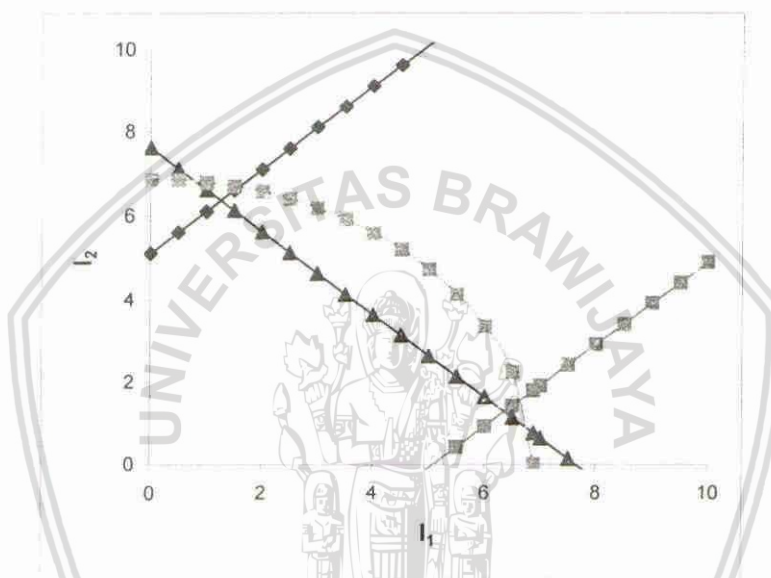
$$l_1^2 + l_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d^2(A, P_i) \quad (4.12)$$

Dengan perhitungan akan didapatkan :

$$l_1^2 + l_2^2 = 6.874 \quad (4.13)$$

$$C_{rob} = 6.874$$

Jika syarat ini *diplotting* ke grafik dengan memakai sumbu  $l_1$ - $l_2$  maka didapatkan :



Gambar 4.3 Plotting  $R_{12}$  Kasus 1

Setelah ditentukan bahwa  $R_{12} = 2$  maka dapat diplot suatu keluarga elips yang disusun dengan memakai rumusan sebagai berikut :

$$\varepsilon_1 \Rightarrow L_1^2/a_1^2 + L_2^2/b_1^2 = c \quad (4.14)$$

dan

$$\varepsilon_2 \Rightarrow L_1^2/a_2^2 + L_2^2/b_2^2 = c \quad (4.15)$$

dengan :

$$a_1 = b_2 = 1/R_{12} \quad (4.16)$$

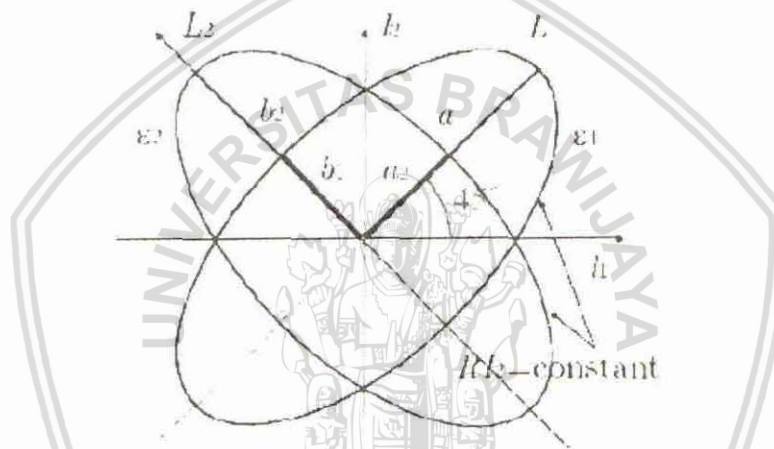
$$a_2 = b_1 = 1/\sqrt{2n - RI_2^2} \quad (4.17)$$

Sehingga elips-elips diatas adalah *isocountur* dari  $RI_2$ .

Tabel 4.1 Variabel elips

No.	$RI_2$	n	$a_1$	$b_2$	$a_2$	$b_1$
1.	2	4	0.5	0.5	0.5	0.5

$L_2$  dan  $L_2$  merupakan ekspresi  $l_1$  dan  $l_2$  pada *frame* koordinat yang diputar sebesar  $45^\circ$  terhadap *frame design variable space*. Sehingga elips yang bersesuaian dengan variabel pada tabel 4.1 diatas adalah sebagai berikut :



Gambar 4.4 Variabel desain untuk nilai  $RI_2$  yang sama

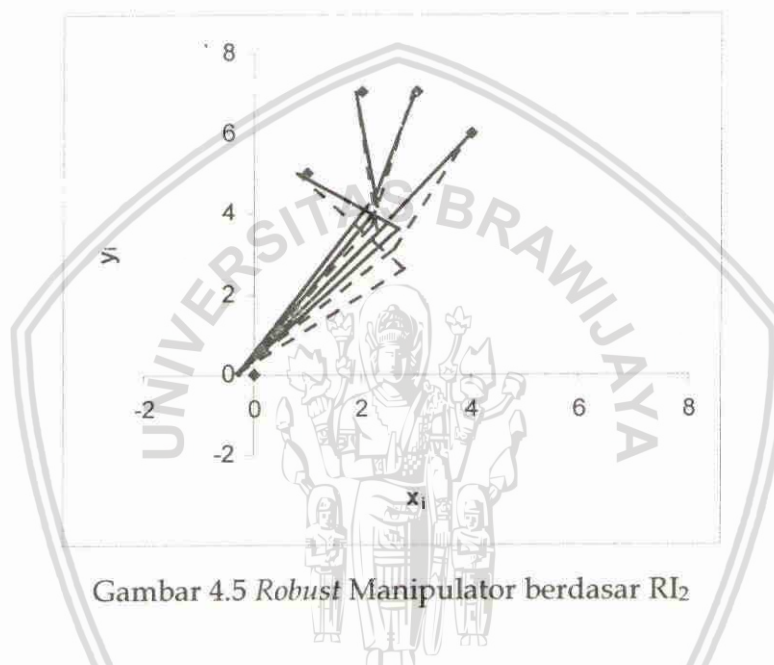
Sumber : Caro, hal

Menurut gambar 4.4 tersebut maka akan banyak sekali pasangan manipulator ( $l_1$ ,  $l_2$ ) yang memenuhi elips atau lingkaran tersebut seperti yang dapat dilihat pada tabel 4.2 berikut ini.



Tabel 4.2 Pasangan  $(l_1, l_2)$  yang memenuhi  $RI_2 = 2$ 

No.	$RI_2$	$l_1$	$l_2$
1.	2	6.000	3.354
2.	2	5.000	4.717
3.	2	4.000	5.590
4.	2	3.000	6.185
5.	2	2.000	6.577
Persamaan yang digunakan : $l_1^2 + l_2^2 = 6.874$			

Gambar 4.5 *Robust* Manipulator berdasar  $RI_2$ 

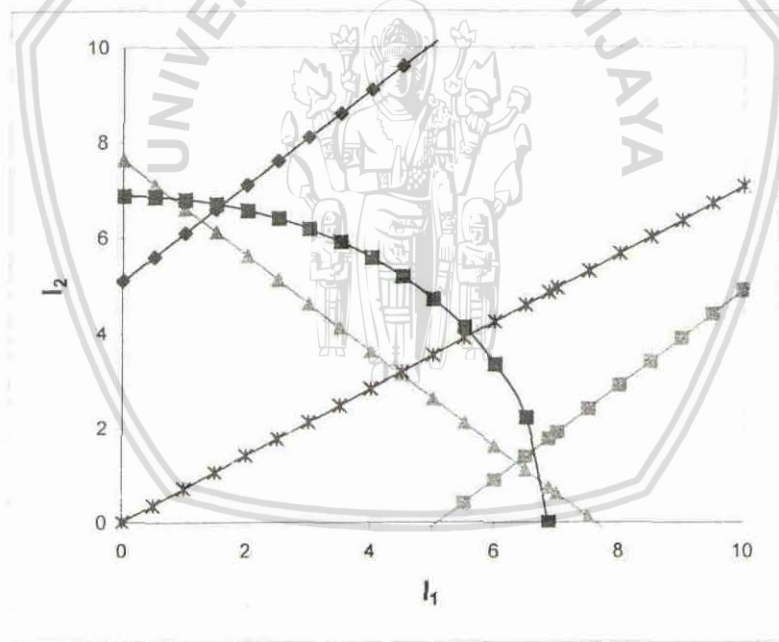
Gambar 4.5 diatas melukiskan dua pasangan  $(l_1, l_2)$  yang memenuhi kriteria *robust* berdasarkan  $RI_2 = 2$ . Karena ada banyak kemungkinan pasangan manipulator yang memenuhinya maka sangat disarankan untuk memakai kriteria lainnya dalam usaha untuk mendapatkan lengan manipulator yang *robust*.

### Dimensi manipulator optimal berdasarkan *dexterity* manipulator

Salah satu kriteria yang sering digunakan untuk menentukan panjang lengan yang optimal adalah *dexterity* lengan manipulator yang dinyatakan dalam matriks Jacobian sebagai berikut :

$$J_k = \begin{bmatrix} -l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Semakin kecil nilai  $J_k$ , maka semakin tinggi *dexterity* suatu manipulator. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Angeles, ditemukan bahwa  $J_k$  akan minimum jika dan hanya jika  $l_2 = l_1 \sqrt{2}/2$ . Dengan memakai persyaratan ini maka dapat digambarkan garis  $\lambda = l_2 = l_1 \sqrt{2}/2$  maka dapat ditentukan dimensi manipulator yang optimal.



Gambar 4.6 Plotting Dexterity Kasus 1

Dari grafik 4.7 dapat ditentukan panjang lengan yang optimal dengan mempertimbangkan *dexterity* manipulator adalah :

$$l_1 = l_{1opt} = 5.61 \quad (4.19)$$

$$l_2 = l_{2opt} = 3.97 \quad (4.20)$$

#### Dimensi manipulator optimal berdasarkan *dynamic manipulability ellipsoid*

Disamping menggunakan kriteria *dexterity* manipulator, dapat juga digunakan kriteria lain yaitu *dynamic manipulability ellipsoid* yang bisa dinyatakan dalam persamaan berikut ini :

$$\tau^T \tau = 1 \quad (4.21)$$

atau bisa juga dinyatakan dalam :

$$X^T M_x(\theta) X = 1 \quad (4.22)$$

Untuk manipulator 2R seperti yang dibahas diatas, dapat juga persamaan elipsoidal dinyatakan sebagai berikut :

$$\left( \dot{v} + J M_x^{-1} g \right)^T J^{-T} M^T M J^{-1} \left( \dot{v} + J M_x^{-1} g \right) = 1 \quad (4.23)$$

Syarat titik-titik yang terkondisi dengan baik pada *workspace* manipulator dikarakterisasi oleh elipsoidal inersia yang sferis atau mendekati sferis (Craig). Syarat ini bisa dinyatakan dengan perbandingan yang sepadan antara sumbu-sumbu pembentuk elipsoidal (a mendekati b). Sumbu-sumbu elipsoidal terletak pada arah dari vektor eigen dari  $M_x(\theta)$  dan panjang sumbu dan kebalikan dari akar kuadrat nilai eigen menyatakan panjang dari masing-masing sumbu.

Untuk manipulator 2R yang dibahas diatas maka :

$$M_x(\theta) = \begin{bmatrix} m_2 + \frac{m_1}{s_2^2} & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

sehingga nilai eigen dari matriks tersebut adalah :

$$\det[M_x(\theta) - \lambda I] = \begin{bmatrix} m_2 + \frac{m_1}{s_2^2} - \lambda & 0 \\ 0 & m_2 - \lambda \end{bmatrix} \quad (4.25)$$



$$= \left( m_2^2 + \frac{m_1 m_2}{s_2^2} \right) - \lambda \left( 2 m_2 + \frac{m_1}{s_2^2} \right) + \lambda^2 \quad (4.26)$$

Syarat agar sumbu-sumbu elipsoidal inersia sama maka syarat berikut ini harus dipenuhi :

$$\left( - \left( 2 m_2 + \frac{m_1}{s_2^2} \right) \right)^2 = 4 \left( m_2^2 + \frac{m_1 m_2}{s_2^2} \right) \quad (4.27)$$

$$4m_2^2 + 2 \frac{m_2 m_1}{s_2^2} + 2 \frac{m_2 m_1}{s_2^2} + \frac{m_1^2}{s_2^4} = 4 \left( m_2^2 + \frac{m_1 m_2}{s_2^2} \right) \quad (4.28)$$

$$\frac{m_1^2}{s_2^4} = 0 \quad (4.29)$$

Dari persamaan diatas maka dapat diketahui bahwa  $\sin \theta_2$  harus sebesar mungkin sedangkan  $m_1$  harus sekecil mungkin.

Disamping itu sering juga dipakai sebuah ukuran yang disebut *manipulability measure* ( $w$ ) yang dinyatakan dalam :

$$w = |\det(J(\theta))| \quad (4.30)$$

Sebuah manipulator disebut memiliki desain yang baik jika nilai  $w$  sebesar mungkin (Yoshikawa ). Untuk manipulator 2R seperti yang sedang dibahas, maka:

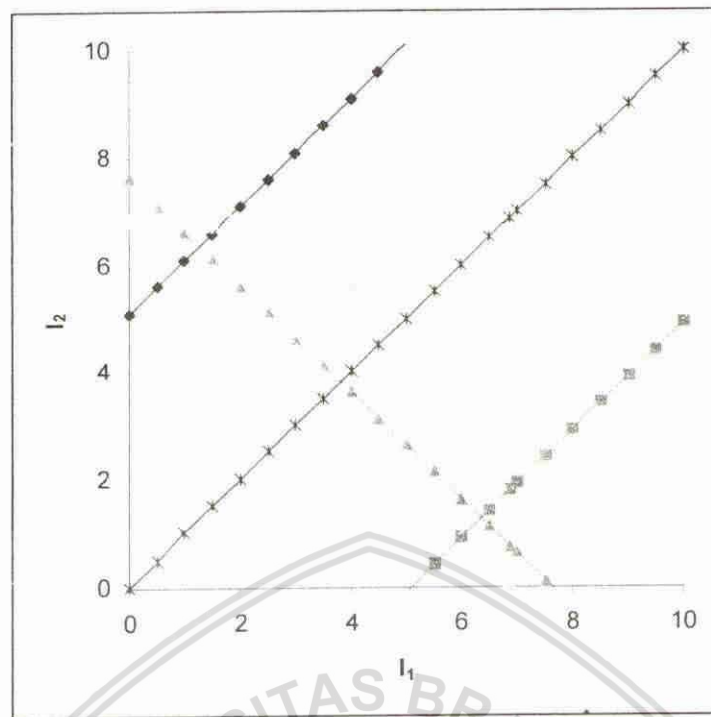
$$w = \left| \det \begin{bmatrix} l_1 s_2 & l_1 c_2 + l_2 \\ 0 & l_2 \end{bmatrix} \right| = \text{maksimum} \quad (4.31)$$

$$\left| \det \begin{bmatrix} l_1 s_2 & l_1 c_2 + l_2 \\ 0 & l_2 \end{bmatrix} \right| = \text{maksimum} \quad (4.32)$$

untuk pasangan manipulator yang masih dalam daerah  $C_{rob}$  maka  $\theta_2$  harus maksimum ( $90^\circ$ ) dan pasangan yang memenuhi adalah :

$$w = l_1 s_2 l_2 \rightarrow \text{maksimum} \quad (4.33)$$

Syarat agar  $w$  maksimum adalah  $l_1 = l_2$  dimang *plotting* dari kondisi tersebut adalah :



Gambar 4.7 Plotting Dynamic Manipulability Ellipsoid Kasus 1

sehingga :

$$l_1 = l_{1opt} = 4.86$$

$$l_2 = l_{2opt} = 4.86$$

(4.44)

## 4.5.2 Daerah Kerja Dibatasi oleh 4 Buah Titik

### 4.5.2.1 Tahap penentuan dimensi manipulator

#### Dimensi manipulator berdasarkan kondisi batas

Agar E (*end-effector*) dapat mencapai semua titik di  $S_T$ , maka syarat berikut harus terpenuhi oleh  $l_1$  dan  $l_2$ .

$$\begin{cases} |l_1 - l_2| \leq r \\ l_1 + l_2 \geq R \end{cases} \quad (4.45)$$

dengan  $r = \min_i d(A, P_i)$ ,  $R = \max_i d(A, P_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$  dan  $d(A, P_i)$  merupakan jarak dari *base* manipulator ke  $P_i$ . Misalnya  $S_T$  yang dikaji dibatasi oleh titik-titik  $P_1 (1, 4)$ ,  $P_2 (2, 8)$ ,  $P_3 (4, 8)$  dan  $P_4 (5, 4)$  maka  $r = \sqrt{17}$  dan  $R = \sqrt{80}$ .

Dari syarat  $|l_1 - l_2| \leq r$  maka diselesaikan sebagai berikut :

$$l_1 - l_2 \leq \sqrt{17} \leq l_1 - l_2 \text{ dengan penyelesaian}$$

$$l_1 - l_2 \leq \sqrt{17} \quad \text{dan} \quad -\sqrt{17} \leq l_1 - l_2$$

$$l_2 \geq l_1 - \sqrt{17} \quad \text{dan} \quad l_2 \leq l_1 + \sqrt{17}$$

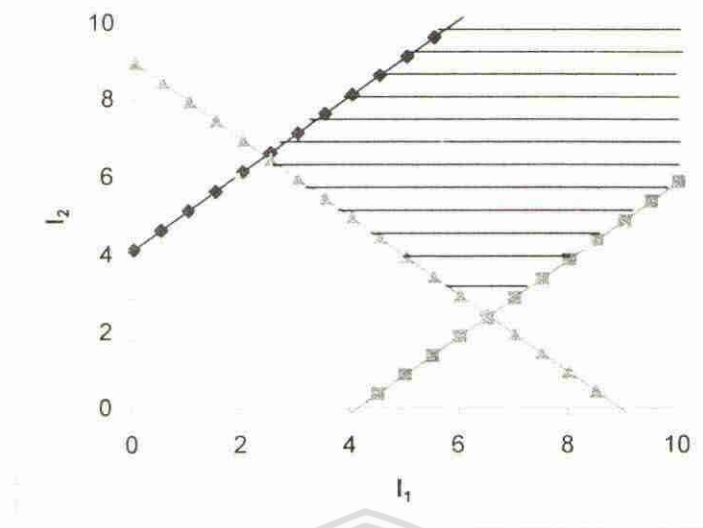
Dari syarat  $l_1 + l_2 \geq R$  maka diselesaikan sebagai berikut :

$$l_1 + l_2 \geq \sqrt{80}$$

$$l_2 \geq \sqrt{80} - l_1$$

Jika syarat tersebut digambarkan dalam koordinat  $l_1$ - $l_2$ , maka dapat dilihat seperti pada gambar 4. berikut ini.





Gambar 4.8 Plotting Kondisi Batas Kasus 2

Daerah yang memenuhi kondisi batas adalah daerah yang diarsir. Karena itu akan banyak sekali  $l_1$  dan  $l_2$  yang memenuhi kondisi batas diatas. Untuk menentukan dimensi manipulator yang optimal maka harus dipakai kriteria lain untuk menentukannya seperti yang akan dibahas di sub bab berikut ini.

#### Dimensi manipulator berdasarkan $RI_2$

$RI_2$  yang minimum akan membuat rancangan lengan manipulator menjadi *robust*. Secara aljabar,  $RI_2$  dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$RI_2 = \sqrt{n + \left| \sum_{i=1}^n \cos \theta_{2i} \right|} \quad (4.46)$$

atau

$$RI_2 = \sqrt{n + \left| \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2 + y_i^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right|} \quad (4.47)$$

Dari persamaan (4.5) didapatkan bahwa  $RI_2$  (*global positioning error*) akan minimum jika  $\cos \theta_{2i}$  mendekati nol (0). Atau dengan kata lain kedua lengan

manipulator dalam posisi hampir tegak lurus satu sama lain. Nilai  $RI_2$  yang memenuhi persamaan (4.5) dan (4.6) adalah dua (2).

Penguraian persamaan (4.6) akan menghasilkan :

$$(RI_2)^2 = \left( \sqrt{n + \left| \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2 + y_i^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right|} \right)^2 \quad (4.48)$$

$$(RI_2)^2 = \left( n + \left| \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2 + y_i^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right| \right) \quad (4.49)$$

$$(RI_2)^2 = n + \left| n \frac{-l_1 - l_2}{2l_1 l_2} \sum_{i=1}^n x_i^2 + y_i^2 \right| \quad (4.50)$$

Sesuai dengan syarat dari persamaan 4.6 maka  $RI_2 = \sqrt{n}$  sehingga :

$$0 = \left| n \frac{-l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \sum_{i=1}^n x_i^2 + y_i^2 \right| \quad (4.51)$$

$$l_1^2 + l_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 + y_i^2 \quad (4.52)$$

atau :

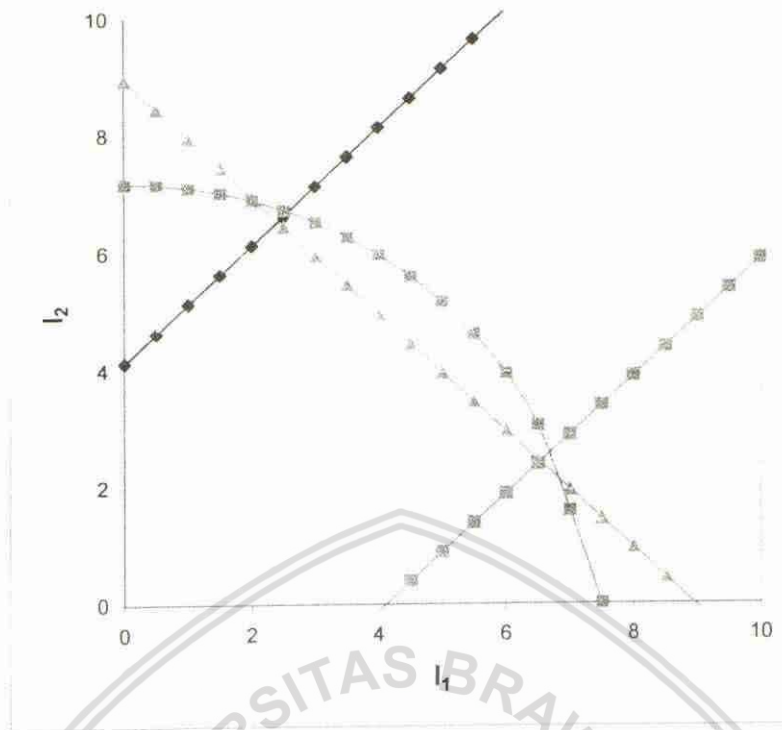
$$l_1^2 + l_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d^2(A, P_i) \quad (4.53)$$

Dengan perhitungan akan didapatkan :

$$l_1^2 + l_2^2 = 51.49 \quad (4.54)$$

$$C_{rob} = 7.176 \quad (4.55)$$

Jika syarat ini *diplotting* ke grafik dengan memakai sumbu  $l_1$ - $l_2$  maka didapatkan :

Gambar 4.9 Plotting  $RI_2$  Kasus 2

Setelah ditentukan bahwa  $RI_2 = 2$  maka dapat diplot suatu keluarga elips yang disusun dengan memakai rumusan sebagai berikut :

$$\varepsilon_1 \Rightarrow L_1^2/a_1^2 + L_2^2/b_1^2 = c \quad (4.56)$$

dan

$$\varepsilon_2 \Rightarrow L_1^2/a_2^2 + L_2^2/b_2^2 = c \quad (4.57)$$

dengan :

$$a_1 = b_2 = 1/RI_2 \quad (4.58)$$

$$a_2 = b_1 = 1/\sqrt{2n - RI_2^2} \quad (4.59)$$

Sehingga elips-elips diatas adalah *isocountur* dari  $RI_2$ .



Tabel 4.3 Variabel elips

No.	$Rl_2$	$n$	$a_1$	$b_2$	$a_2$	$b_1$
1.	2	4	0.5	0.5	0.5	0.5

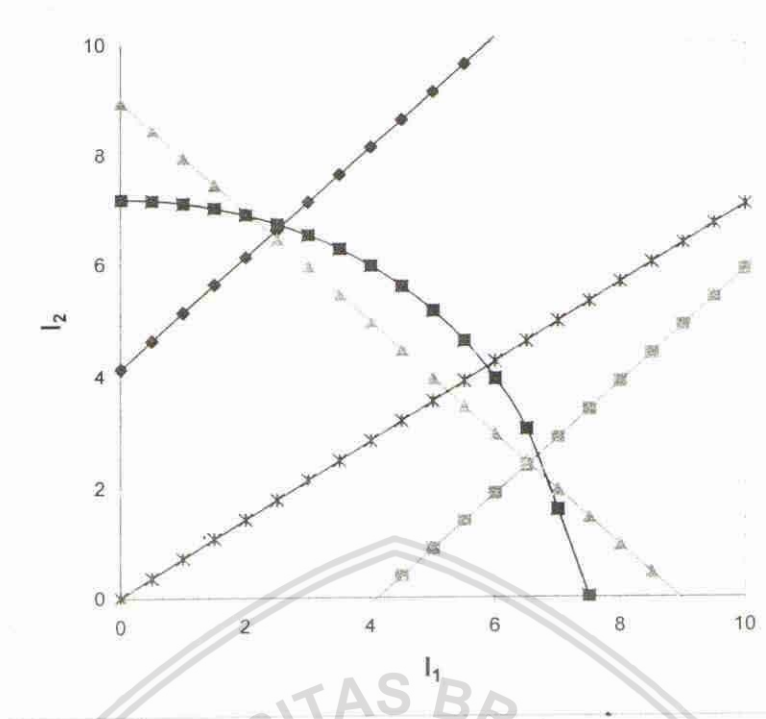
$L_1$  dan  $L_2$  merupakan ekspresi  $l_1$  dan  $l_2$  pada *frame* koordinat yang diputar sebesar  $45^\circ$  terhadap *frame design variable space*.

#### Dimensi manipulator optimal berdasarkan *dexterity* manipulator

Salah satu kriteria yang sering digunakan untuk menentukan panjang lengan yang optimal adalah *dexterity* lengan manipulator yang dinyatakan dalam matriks Jacobian sebagai berikut :

$$J_k = \begin{bmatrix} -l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (4.60)$$

Semakin kecil nilai  $J_k$ , maka semakin tinggi *dexterity* suatu manipulator. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Angeles, ditemukan bahwa  $J_k$  akan minimum jika dan hanya jika  $l_2 = l_1 \sqrt{2}/2$ . Dengan memakai persyaratan ini maka dapat digambarkan garis  $\lambda = l_2 = l_1 \sqrt{2}/2$  maka dapat ditentukan dimensi manipulator yang optimal.



Gambar 4.10 Plotting Dexterity Kasus 2

Dari grafik 4.10 dapat ditentukan panjang lengan yang optimal dengan mempertimbangkan *dexterity* manipulator adalah :

$$l_1 = l_{1opt} = 5.85 \quad (4.61)$$

$$l_2 = l_{2opt} = 4.16 \quad (4.62)$$

#### Dimensi manipulator optimal berdasarkan *dynamic manipulability ellipsoid*

Disamping menggunakan kriteria *dexterity* manipulator, dapat juga digunakan kriteria lain yaitu *dynamic manipulability ellipsoid* yang bisa dinyatakan dalam persamaan berikut ini :

$$\tau^T \tau = 1 \quad (4.63)$$

atau bisa juga dinyatakan dalam :

$$X^T M_x(\theta) X = 1 \quad (4.64)$$

Untuk manipulator 2R seperti yang dibahas diatas, dapat juga persamaan elipsoidal dinyatakan sebagai berikut :

$$\left(\dot{v} + J M_x^{-1} g\right)^T J^{-T} M^T M J^{-1} \left(\dot{v} + J M_x^{-1} g\right) = 1 \quad (4.65)$$

Syarat titik-titik yang terkondisi dengan baik pada *workspace* manipulator dikarakterisasi oleh elipsoidal inersia yang sferis atau mendekati sferis (Craig). Syarat ini bisa dinyatakan dengan perbandingan yang sepadan antara sumbu-sumbu pembentuk elipsoidal (a mendekati b). Sumbu-sumbu elipsoidal terletak pada arah dari vektor eigen dari  $M_x(\theta)$  dan panjang sumbu dan kebalikan dari akar kuadrat nilai eigen menyatakan panjang dari masing-masing sumbu.

Untuk manipulator 2R yang dibahas diatas maka :

$$M_x(\theta) = \begin{bmatrix} m_2 + \frac{m_1}{s_2^2} & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad (4.66)$$

sehingga nilai eigen dari matriks tersebut adalah :

$$\det[M_x(\theta) - \lambda I] = \begin{vmatrix} m_2 + \frac{m_1}{s_2^2} - \lambda & 0 \\ 0 & m_2 - \lambda \end{vmatrix} \quad (4.67)$$

$$= \left(m_2^2 + \frac{m_1 m_2}{s_2^2}\right) - \lambda \left(2m_2 + \frac{m_1}{s_2^2}\right) + \lambda^2 \quad (4.68)$$

Syarat agar sumbu-sumbu elipsoidal inersia sama maka syarat berikut ini harus dipenuhi :

$$\left(-\left(2m_2 + \frac{m_1}{s_2^2}\right)\right)^2 = 4\left(m_2^2 + \frac{m_1 m_2}{s_2^2}\right) \quad (4.69)$$

$$4m_2^2 + 2\frac{m_2 m_1}{s_2^2} + 2\frac{m_2 m_1}{s_2^2} + \frac{m_1^2}{s_2^4} = 4\left(m_2^2 + \frac{m_1 m_2}{s_2^2}\right) \quad (4.70)$$

$$\frac{m_1^2}{s_2^4} = 0 \quad (4.71)$$



Disamping itu sering juga dipakai sebuah ukuran yang disebut *manipulability measure* ( $w$ ) yang dinyatakan dalam :

$$w = |\det(J(\theta))| \quad (4.72)$$

Sebuah manipulator disebut memiliki desain yang baik jika nilai  $w$  sebesar mungkin (Yoshikawa ). Untuk manipulator 2R seperti yang sedang dibahas, maka:

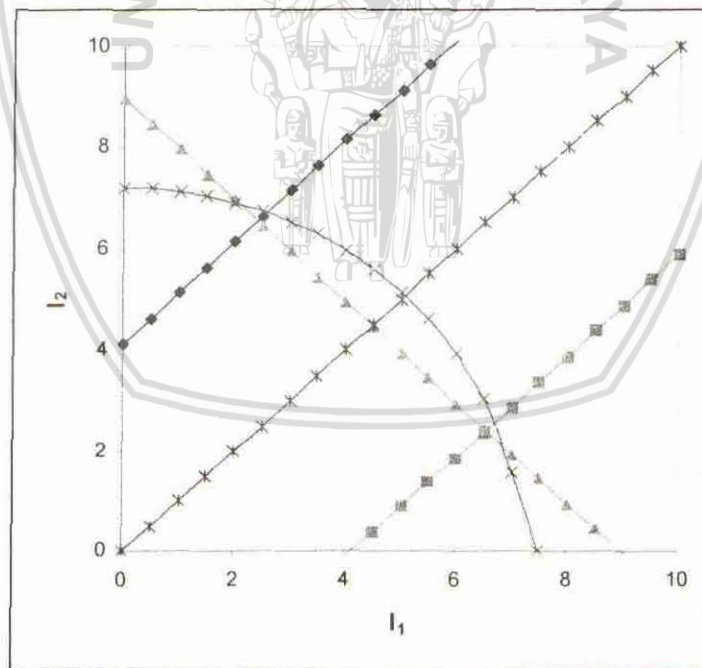
$$w = \left| \det \begin{bmatrix} l_1 s_2 & l_1 c_2 + l_2 \\ 0 & l_2 \end{bmatrix} \right| = \text{maksimum} \quad (4.73)$$

$$\left| \det \begin{bmatrix} l_1 s_2 & l_1 c_2 + l_2 \\ 0 & l_2 \end{bmatrix} \right| = \text{maksimum} \quad (4.74)$$

untuk pasangan manipulator yang masih dalam daerah  $C_{rob}$  maka  $\theta_2$  harus maksimum ( $90^\circ$ ) dan pasangan yang memenuhi adalah :

$$w = l_1 s_2 l_2 \rightarrow \text{maksimum} \quad (4.75)$$

Syarat agar  $w$  maksimum adalah  $l_1 = l_2$  dimang *plotting* dari kondisi tersebut adalah :



Gambar 4.11 Plotting *Dynamic Manipulability Ellipsoid* Kasus 2

sehingga :

$$\begin{aligned} l_1 &= l_{1\text{opt}} = 5.074 \\ l_2 &= l_{2\text{opt}} = 5.074 \end{aligned} \quad (4.76)$$

#### 4.6 Tahap Penentuan Kombinasi Dimensi Manipulator

Dalam tahapan dipilih beberapa kombinasi dimensi manipulator yang didapatkan dari *plotting* RI<sub>2</sub> yang dapat dilihat pada tabel berikut ini :

Tabel 4.4 Kombinasi Dimensi Manipulator

Studi Kasus 1		
No.	$l_{1\text{opt}}$	$l_{2\text{opt}}$
<i>Dexterity</i>	5.61	3.97
<i>Workspace</i>	4.86	4.86
Studi Kasus 2		
No.	$l_{1\text{opt}}$	$l_{2\text{opt}}$
<i>Dexterity</i>	5.85	4.16
<i>Workspace</i>	5.07	5.07

#### 4.7 Tahap Penghitungan Torsi Motor

Persamaan torsi yang dibutuhkan lengan untuk bergerak adalah sebagai berikut (Craig : 1989) :

$$\tau = J^T(\theta)(M_x(\theta)\ddot{\chi} + V_x(\theta, \dot{\theta}) + G_x(\theta)) \quad (4.77)$$

yang bila dinyatakan dalam masing-masing lengan menjadi :

$$\begin{aligned} \tau_1 &= m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 l_1 l_2 c_2 (2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + (m_1 + m_2) l_1^2 \ddot{\theta}_1 - m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2^2 \\ &\quad - 2m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m_2 l_2 g c_{12} + (m_1 + m_2) l_1 g c_1 \end{aligned} \quad (4.78)$$

$$\tau_2 = m_2 l_1 l_2 c_2 \ddot{\theta}_1 + m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_1^2 + m_2 l_2 g c_{12} + m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \quad (4.79)$$

Dengan asumsi tidak terjadi gesekan dan tidak ada kontak dengan dunia luar dan variabel-variabel misalnya seperti berikut :

$$P = (1, 5)$$

$$l_1 = l_2 = 10 \text{ kg, sehingga } m_1 = l_1 \cdot l_1 \text{ dan } m_2 = l_2 \cdot l_2.$$

$$g = 9,8 \text{ m/detik}^2$$

Untuk panjang lengan-lengan optimal seperti yang telah didapatkan diatas, maka perbandingan torsi yang digunakan untuk menggerakkan lengan-lengan tersebut adalah :

Tabel 4.5 Parmeter Penghitungan Torsi

Kasus 1								
No.	$l_1$	$l_2$	$m_1$	$m_2$	$g$	$\theta_1$	$\theta_2$	
1.	5.61	3.97	56.1	39.7	9.8	34.81	61.53	
2.	4.86	4.86	48.6	48.6	9.8	20.33	63.28	
Kasus 2								
No.	$l_1$	$l_2$	$m_1$	$m_2$	$g$	$\theta_1$	$\theta_2$	
1.	5.85	4.16	58.5	41.6	9.8	34.7	58.37	
2.	5.07	5.07	50.7	50.7	9.8	18.88	60.38	

Tabel 4.6 Parameter Penghitungan Torsi (lanjutan)

Kasus 1								
No.	$l_1$	$l_2$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\dot{\theta}_1$	$\dot{\theta}_2$	$\ddot{\theta}_1$	$\ddot{\theta}_2$
1.	5.61	3.97	34.81	61.53				
2.	4.86	4.86	20.33	63.28				
Kasus 2								
No.	$l_1$	$l_2$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\dot{\theta}_1$	$\dot{\theta}_2$	$\ddot{\theta}_1$	$\ddot{\theta}_2$
1.	5.85	4.16	34.7	58.37				
2.	5.07	5.07	18.88	60.38				



Tabel 4.7 Torsi Manipulator

Kasus 1				
No.	$l_1$	$l_2$	$\tau_1$	$\tau_2$
1.	5.61	3.97	7352.953	2279.601
2.	4.86	4.86	7662.743	4094.912
Kasus 2				
No.	$l_1$	$l_2$	$\tau_1$	$\tau_2$
1.	5.85	4.16	8499.530	2741.912
2.	5.07	5.07	8983.045	4852.968

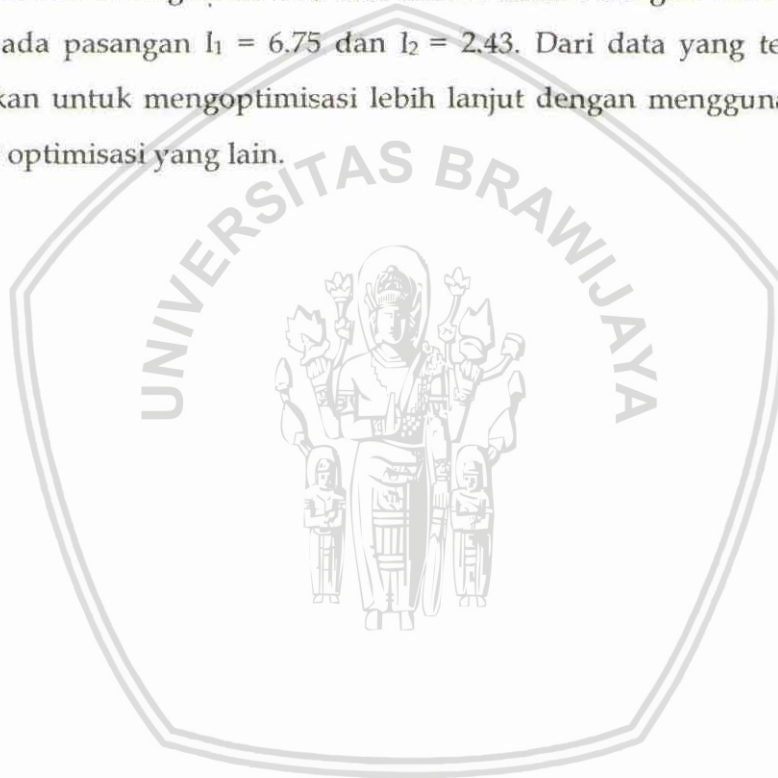


Tabel 4.8 Torsi untuk Panjang Manipulator Lainnya

No.	$l_1$	$l_2$	$m_1$	$m_2$	$g$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\tau_1$	$\tau_2$
1.	0.00	7.18	0	71.76	9.8				
2.	0.25	7.17	2.50	71.71	9.8				
3.	0.50	7.16	5.00	71.58	9.8				
4.	0.75	7.14	7.50	71.36	9.8				
5.	1.00	7.11	10.00	71.06	9.8				
6.	1.25	7.07	12.50	70.66	9.8				
7.	1.50	7.02	15.00	70.17	9.8				
8.	1.75	6.96	17.50	69.59	9.8				
9.	2.00	6.89	20.00	68.91	9.8	-78.94	157.63	4428.654	6941.340
10.	2.25	6.81	22.50	68.14	9.8	-67.54	146.23	4094.454	6931.415
11.	2.50	6.73	25.00	67.26	9.8	-60.59	139.28	3856.699	6835.770
12.	2.75	6.63	27.50	66.28	9.8	-55.68	134.37	3676.492	6685.956
13.	3.00	6.52	30.00	65.18	9.8	-51.98	130.67	3543.515	6492.013
14.	3.25	6.40	32.50	63.97	9.8	-49.12	127.81	3454.571	6258.832
15.	3.50	6.26	35.00	62.64	9.8	-46.85	125.54	3409.152	5989.446
16.	3.75	6.12	37.50	61.18	9.8	-45.06	123.75	3407.942	5686.129
17.	4.00	5.96	40.00	59.57	9.8	-43.64	122.33	3452.142	5350.854
18.	4.25	5.78	42.50	57.82	9.8	-42.55	121.24	3543.085	4985.539
19.	4.50	5.59	45.00	55.89	9.8	-41.76	120.45	3681.942	4592.195
20.	4.75	5.38	47.50	53.78	9.8	-41.24	119.93	3869.415	4173.041
21.	5.00	5.15	50.00	51.47	9.8	-41.00	119.69	4105.345	3730.613
22.	5.25	4.89	52.50	48.92	9.8	-41.06	119.75	4388.080	3267.882
23.	5.50	4.61	55.00	46.09	9.8	-41.50	120.19	4713.377	2788.407
24.	5.75	4.29	57.50	42.93	9.8	-42.40	121.09	5072.241	2296.549
25.	6.00	3.94	60.00	39.36	9.8	-43.97	122.66	5446.162	1797.806
26.	6.25	3.53	62.50	35.25	9.8	-46.65	125.34	5794.787	1299.342
27.	6.50	3.04	65.00	30.40	9.8	-51.48	130.17	6015.431	810.862
28.	6.75	2.43	67.50	24.35	9.8	-62.16	140.85	5735.682	344.845
29.	7.00	1.58	70.00	15.78	9.8				

## BAB V ANALISIS DATA

Dari hasil perhitungan data diatas dapat dilihat bahwa panjang lengan yang didapat dengan memakai kriteria *dexterity* lebih kecil kebutuhan torsinya jika dibanding dengan kriteria *dynamic manipulability ellipsoidal* untuk kasus 1 dan 2 dengan kombinasi  $l_1 = 5.61$  dan  $l_2 = 3.97$  untuk kasus 1 dan  $l_1 = 5.85$  dan  $l_2 = 4.16$  untuk kasus 2. Sedangkan jika dilihat dari beberapa pasangan lengan kasus 2 yang masih berada dalam lingkaran  $C_{rob}$  bisa dilihat bahwa dengan torsi total terkecil diperoleh pada pasangan  $l_1 = 6.75$  dan  $l_2 = 2.43$ . Dari data yang terlihat masih dimungkinkan untuk mengoptimisasi lebih lanjut dengan menggunakan kriteria dan metode optimisasi yang lain.





## BAB VI KESIMPULAN

Kesimpulan yang bisa diambil adalah penelitian ini adalah metode yang dikembangkan (metode *tolerance synthesis*) merupakan metode yang efisien dalam mendesain lengan robot yang *robust*. Juga dari analisis data diketahui bahwa kriteria *dexterity* memberikan hasil yang lebih baik, dalam hal torsi manipulator, dibandingkan dengan kriteria *dynamic manipulability ellipsoid*.



## LAMPIRAN-LAMPIRAN

### 1. Daftar Pustaka

- Al-Widyan, K., dan Angeles, J., (2003). *Recent Advance in Integrated Design and Manufacturing in Mecanical Engineering*. Kluwer Academic Publiser, New York.
- Batson, Robert G. dan Elam, Matthew E. (2000). *Robust Design : An Experiment-based Approach to Design for Reliability*. Department of Industrial Engineering, The University of Alabama.
- Caro, Stephane, et. al. (2005). *Tolerance Synthesis of Mechanism : A Robust Design Approach*. Transactions of the ASME. 127. pp 86 – 94.
- Chase, K., Gao, J., Magleby, S.P. dan Sorensen, C.D., (1996). *Including Geometric Features Variations in Tolerance Analysis of Mecanical Assembly*. IEE Trans., 28, pp. 795-807.
- Craig, J.J. (1989)., *Introduction to Robotics : Mechanics and Control*, Addison-Wesley Publising Company.
- Lee, W.J., Woo, T.C., dan Chou, S., (1993). *Tolerance Synthesis for Nonlinier Systems Based on Non Linier Programming*. IEE Trans., 25(1), pp. 51-61.
- Parkinson, D.B, (2000). *The Apllication of a Robust Design Methods to Tolerancing*, ASME J. Mech. Des, 22, pp 149 – 154.
- Taylor, Wayne A. (1996). *Comparing Three Approaches to Robust Design : Taguchi Versus Response Versus Tolerance Analysis*. Proceeding at Fall Technical Conference. pp 1 –10.
- Ting, K.L, dan Loung, . (1996), *Performance Quality and Tolerance Sensitivityof Mechanism*. ASME J. Mech. Des, 118, pp 144 – 150.
- Zhu, J., dan Ting, K.L, (2001), *Performance Distribution Analysis and Robust Design*. ASME J. Mech, Des, 123, pp 11 –17.

2. Riwayat Hidup Ketua dan Anggota Peneliti

Riwayat Penelitian Ketua Penelitian

- 2002 Pengembangan dan Pengujian *Remote Servo System* Penelitian Mandiri.
- 2003 Pengaruh *Heat Treatment* pada Retak Mikro Hasil Lasan Dana DPP
- 2004 Analisis *Discrete Event Simulation* untuk Optimasi dan Evaluasi *Layout* pada Sistem Manufaktur Dana DPP

Riwayat Penelitian Anggota I

- 2001 Analisis *Discrete Event Simulation* untuk Optimasi dan Evaluasi *Layout* pada sistem Manufaktur Penelitian Mandiri
- 2004 Analisis *Discrete Event Simulation* untuk Optimasi dan Evaluasi *Layout* pada Sistem Manufaktur Dana DPP

